

Javier Mazo Olarte

Investigación sobre la aplicación del almacenamiento de energía térmica mediante materiales de cambio de fase en elementos de construcción termoactivos

Departamento
Ingeniería Mecánica

Director/es
Zalba Nonay, Belén
Marín Herrero, José María

<http://zaguan.unizar.es/collection/Tesis>

Tesis Doctoral

INVESTIGACIÓN SOBRE LA APLICACIÓN DEL ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA MEDIANTE MATERIALES DE CAMBIO DE FASE EN ELEMENTOS DE CONSTRUCCIÓN TERMOACTIVOS

Autor

Javier Mazo Olarte

Director/es

Zalba Nonay, Belén Marín

Herrero, José María

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

Ingeniería Mecánica

2016

Tesis Doctoral

*Investigación sobre la aplicación
del almacenamiento de energía térmica
mediante materiales de cambio de fase
en elementos de construcción termoactivos*

Autor

Javier Mazo Olarte

Director/es

Dra. Belén Zalba Nonay
Dr. José María Marín Herrero

Escuela de Ingeniería y Arquitectura de Zaragoza
2015

Índice

ÍNDICE	3
ÍNDICE DE FIGURAS	9
ÍNDICE DE TABLAS	15
NOMENCLATURA	19
LETRAS LATINAS.....	19
LETRAS GRIEGAS.....	20
SUBÍNDICES	20
ACRÓNIMOS.....	21
AGRADECIMIENTOS.....	23
RESUMEN.....	25
INTRODUCCIÓN.....	27
Marco de la tesis y antecedentes	30
CAPÍTULO 1. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE SOBRE UTILIZACIÓN DEL ALMACENAMIENTO TÉRMICO CON PCM EN ELEMENTOS DE CONSTRUCCIÓN TERMOACTIVOS.....	31
1.1. Trabajos de investigación relacionados con el uso de PCM en elementos termoactivos	31
1.1.1. Sistemas de suelo radiante eléctrico.....	32
1.1.2. Sistemas de calefacción y refrigeración integrados en superficies interiores, activados mediante la circulación de un fluido caloportador.....	34
1.1.2.1. Sistemas de calefacción o refrigeración integrados en el suelo	34
1.1.2.2. Sistemas de refrigeración o calefacción integrados en el techo.....	37
1.1.3. Análisis de los trabajos de investigación revisados.....	39
1.1.3.1. Materiales utilizados	44
1.1.3.2. Aplicación del almacenamiento de energía térmica	44
1.1.3.3. Transferencia de calor en los elementos termoactivos	46
1.2. Patentes sobre elementos termoactivos.....	47
1.2.1. Metodología.....	47
1.2.2. Patentes sobre sistemas de calefacción o refrigeración integrados en superficies	47
Suelos radiantes eléctricos.....	47
1.2.2.2. Sistemas de suelos radiantes o refrescantes activados mediante la circulación de agua	48
Techos refrescantes.....	52
1.2.3. Análisis de las patentes revisadas	54
1.3. Incorporación de los PCM en materiales de construcción	56
1.3.1. Hormigón y PCM.....	57
1.3.2. Compuestos con yeso	59
1.3.3. PCM orgánicos integrados en una matriz polimérica	59
1.4. Materiales y elementos de construcción activos actualmente comercializados	63
1.5. Determinación de propiedades y análisis de características de los materiales	66
1.5.1. Determinación de la curva entalpía-temperatura	67
1.5.1.1. T-history.....	67

1.5.1.2. Dispositivos experimentales basados en el método de placa caliente	71
1.5.1.3. Otros dispositivos.....	74
1.5.1.4. Discusión.....	75
1.5.2. Análisis de características de los materiales de construcción compuestos con PCM	76
1.5.2.1. Análisis del comportamiento frente al fuego	76
1.6. Simulación del comportamiento térmico de los PCM integrados en elementos de construcción.....	79
1.6.1. Métodos matemáticos para el análisis de la transferencia de calor en los elementos de construcción	79
1.6.1.1. Métodos matemáticos para la simulación de elementos pasivos.....	80
1.6.1.1a. Funciones de transferencia.....	80
1.6.1.1b. Diferencias finitas	80
1.6.1.2. Métodos matemáticos para la simulación de elementos activos.....	80
1.6.1.2a. Métodos basados en esquemas multidimensionales de volúmenes finitos, diferencias finitas y elementos finitos.....	81
1.6.1.2b. Modelos basados en circuitos equivalentes de resistencias y capacidades térmicas (RC)	81
1.6.1.2c. Funciones de transferencia	82
1.6.1.2d. Modelos basados en soluciones analíticas.....	82
1.6.2. Modelos integrados dentro de los programas de simulación energética de edificios para el cálculo de la transferencia de calor en elementos de construcción pasivos con PCM	83
1.6.2.1. EnergyPlus.....	83
1.6.2.1a. Verificación, inter-comparación y validación en EnergyPlus	84
1.6.2.2. TRNSYS	85
1.6.2.2a. Verificación, inter-comparación y validación en TRNSYS	86
1.6.2.3. ESP-r.....	86
1.6.2.4. Discusión	89
1.6.3. Modelos integrados dentro de los programas de simulación energética de edificios para el cálculo de la transferencia de calor en elementos de construcción activos.....	90
1.6.3.1a. EnergyPlus	90
1.6.3.1b. TRNSYS.....	91
1.6.3.1c. ESP-r	92
1.6.3.2. Simulación de elementos de construcción activa con PCM.....	93
1.6.3.2a. Validación-Verificación.....	94
1.6.3.3. Discusión.....	95
1.7. Conclusiones del capítulo.....	99
1.7.1. Determinación de propiedades y análisis de características de materiales compuestos de construcción con PCM	102
1.7.2. Simulación de elementos activos con PCM.....	103
CAPÍTULO 2. OBJETIVOS	105
2.1. Objetivos generales.....	105
2.2. Objetivos específicos	106
2.2.1. Diseño de una instalación experimental	106
2.2.2. Determinación de propiedades y análisis de características de los materiales.....	106
2.2.3. Simulación numérica	108
CAPÍTULO 3. DETERMINACIÓN DE LA CURVA ENTALPÍA-TEMPERATURA MEDIANTE EL MÉTODO T-HISTORY.....	109
3.1. Introducción	109

3.2. Estudio de la influencia del gradiente térmico radial en la muestra.....	109
3.2.1. Modelo general de transferencia de calor en las muestras	110
3.2.1.1. Análisis dimensional	111
3.2.2. Modelo analítico: cálculo de la desviación en la medida del calor específico ...	111
3.2.3. Efecto del cambio de fase: análisis a través de un modelo numérico.....	116
3.2.3.1. Identificación de los errores	116
3.2.3.2. Análisis de los resultados	117
3.2.3.2a. Análisis paramétrico	117
3.2.3.2b. Estudio de la interacción entre las variables adimensionales.....	119
3.2.3.2c. Análisis de las correlaciones extraídas. Extrapolación a una muestra del espacio completo de las variables adimensionales.....	122
3.2.4. Discusión	123
3.2.4.1. Aplicación de los resultados a un caso general	124
3.3. Influencia del error de medida de las sondas de temperatura en los resultados del método T-history	125
3.3.1. Error en la medida de temperatura de la sonda	125
3.3.2. Propagación de incertidumbres a través del método	126
3.4. Determinación de la curva entalpía-temperatura mediante T-history.....	130
3.4.1. Materiales analizados.....	130
3.4.2 Metodología.....	130
3.4.3. Resultados.....	132
3.5. Medida complementaria de la variación de entalpía en materiales granulados: estudio experimental balance de energía en el intercambio de calor con aire en un lecho axial.....	133
3.5.1. Descripción del método.....	134
3.5.2. Propagación de incertidumbres en la medida experimental del incremento de entalpía.....	136
3.5.3. Selección de las condiciones de ensayo	137
3.5.3.1. Modelo numérico.....	137
3.5.3.2. Evaluación de la influencia de las condiciones de ensayo	139
3.5.4. Resultados experimentales	140
3.5.5. Comparación de los resultados	142
3.6. Conclusiones del capítulo.....	143
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES DE MUESTRAS DE MORTERO Y PCM	145
4.1. Introducción	145
4.2. Preparación de las muestras.....	145
4.3. Medida de la densidad aparente	146
4.4. Análisis de la respuesta térmica de las muestras. Medida de la difusividad térmica del material.....	148
4.5. Medida de la efusividad y de la conductividad térmica.....	153
4.5.1. Metodología.....	154
4.5.2. Medidas experimentales	154
4.6. Análisis de las medidas de conductividad térmica y del calor específico	155
4.6.1. Influencia del contenido del PCM en la conductividad térmica.....	156
4.6.2. Influencia del contenido en PCM en el calor específico.....	157
4.7. Evaluación de la capacidad de almacenamiento del material compuesto de mortero y PCM.....	158
4.8. Análisis del comportamiento frente al fuego	161
4.8.1. Ensayo de goteo (UNE 23725:1990).....	162
4.8.2. Ensayo de medición del humo	163
4.8.3. Calorímetro de flujo de combustión por pirólisis (PCFC)	164

4.8.4. Ensayos a pequeña escala de resistencia al fuego	166
4.8.5. Discusión	168
4.9. Conclusiones del capítulo.....	169
CAPÍTULO 5. DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS DESARROLLADOS.....	173
5.1. Descripción del modelo de simulación energética de edificios sencillos.....	173
5.1.1. Condiciones de contorno sobre las superficies exteriores	173
5.1.1.1. Radiación de onda corta	174
5.1.1.2. Radiación de onda larga.....	175
5.1.1.3. Transferencia de calor por convección.....	175
5.1.2. Condiciones de contorno radiativas sobre las superficies interiores	175
5.1.2.1. Intercambio de radiación de onda corta entre las superficies interiores..	175
5.1.2.2. Intercambio de radiación de onda larga entre las superficies interiores ..	177
5.1.3. Cerramientos acristalados.....	178
5.1.3.1. Cálculo de la variación de las propiedades de la lámina de vidrio con el ángulo de incidencia.....	179
5.1.3.2. Cálculo de las características de un acristalamiento doble.....	180
5.1.3.3. Transferencia de calor a través del elemento acristalado	181
5.1.3.3a. Conducción del calor.....	181
5.1.3.3b. Convección y radiación en la cámara de aire.....	181
5.1.4. Transferencia de calor por conducción a través de los cerramientos opacos..	182
5.1.5. Balance de energía al aire interior	182
5.1.6. Resumen de las características del modelo y comparativa con los programas de simulación actualmente disponibles.....	182
5.1.6.1. Limitaciones.....	183
5.2. Comprobación de la fiabilidad del modelo	187
5.2.1. Justificación	187
5.2.2. Metodología aplicada para la verificación	189
5.2.3. Intercomparación: metodología BESTEST	190
5.2.3.1. Breve descripción de los casos analizados: building fabric test cases	192
5.2.4. Análisis de los resultados	194
5.2.4.1. Resultados de los casos aplicados al diagnóstico.....	195
5.2.4.2. Cualificación del modelo.....	197
5.3. Modelo de suelo radiante con PCM.....	199
5.3.1. Descripción de los modelos utilizados.....	199
5.3.1.1. Modelo bidimensional integrado en Fluent.....	199
5.3.1.2. Modelo bidimensional (malla ortogonal)	200
5.3.1.3. Modelo unidimensional	201
5.3.2. Intercomparación de los modelos.....	202
5.3.2.1. Solución en la situación estacionaria	203
5.3.2.2. Análisis de la evolución transitoria.....	206
5.3.2.2a. Influencia del método de discretización de la variación temporal de entalpía	206
5.3.2.2b. Procesos de puesta en marcha y descarga	207
5.3.3. Transferencia de calor entre los tubos y la losa	209
5.3.4. Evaluación de la validez del modelo unidimensional	210
5.3.4.1. Análisis de la respuesta transitoria.....	211
5.3.4.2. Evaluación de la energía térmica almacenada en la situación estacionaria	212
5.3.5. Integración del modelo en el global de transferencia de calor en zonas de edificios	214

5.3.5.1. Evaluación de la respuesta de los modelos integrada con el resto de elementos de construcción.....	216
5.4. Conclusiones del capítulo.....	219
CAPÍTULO 6. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y DE PROPAGACIÓN DE INCERTIDUMBRES.....	223
6.1. Introducción	223
6.1.1. Objetivos	225
6.1.2. Marco de trabajo y selección del caso de estudio	226
6.2. Método Montecarlo.....	226
6.3. Caso de estudio.....	228
6.3.1. Propiedades termofísicas del PCM	229
6.3.2. Incertidumbre en las propiedades del material	230
6.3.3. Simulación de los cubículos experimentales con PCM	232
6.3.3.1. Aproximación numérica de la curva entalpía-temperatura.....	232
6.3.3.2. Análisis de la influencia de la discretización numérica	233
6.4. Resultados	234
6.4.1. Cálculo de la energía consumida en calefacción y refrigeración	234
6.4.2. Evaluación de la incertidumbre en los resultados	237
6.4.3. Análisis de sensibilidad: influencia de la incertidumbre de los parámetros de entrada	238
6.4.4. Propagación de incertidumbre y análisis de sensibilidad sobre un caso de estudio con la temperatura de cambio de fase óptima.....	241
6.4.5. Reducción de la incertidumbre en los resultados a través de la mejora en la exactitud de las medidas.....	243
6.6. Conclusiones del capítulo.....	246
CAPÍTULO 7. SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE SUELO RADIANTE CON PCM.....	249
7.1. Introducción	249
7.2. Descripción del caso de estudio	250
7.2.1. Instalación experimental	250
7.2.2. Geometría del suelo radiante	251
7.2.3. Propiedades del material compuesto de mortero y PCM	252
7.2.4. Cálculo del comportamiento de la bomba de calor	253
7.2.5. Datos climáticos.....	254
7.2.6. Tarifa eléctrica	254
7.2.7. Sistema de control	254
7.3. Alternativas de diseño	255
7.3.1. Compensación de la emisión térmica del suelo radiante	255
7.4. Análisis del funcionamiento	258
7.4.1. Operación durante un día tipo.....	258
7.4.1.1. Influencia del PCM seleccionado.....	261
7.4.2. Análisis del funcionamiento durante una temporada completa	262
7.4.2.1. Influencia de la cantidad de PCM.....	266
7.4.2.1a. Análisis de la inversión	268
7.4.2.1b. Influencia del contenido en PCM sobre la rentabilidad de la inversión	270
7.5. Análisis de sensibilidad y de propagación de incertidumbre	275
7.5.1. Selección del caso de estudio particular.....	275
7.5.2. Descripción de la incertidumbre de las propiedades de los materiales medidas	276
7.5.2.1. Tratamiento matemático de la incertidumbre de la curva h-T	277
7.5.3. Propagación de incertidumbres.....	279

7.5.4. Análisis de sensibilidad	279
7.6. Conclusiones del capítulo.....	281
CONCLUSIONES	285
Revisión del estado del arte.....	285
Determinación de propiedades.....	286
Desarrollo de herramientas de simulación	287
Análisis de sensibilidad y propagación de incertidumbres.....	288
Análisis del comportamiento térmico de un suelo radiante con PCM	289
Difusión de resultados	290
Líneas de trabajo futuro	291
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS CONSULTADAS.....	295
PATENTES.....	309
NORMAS	311
PAGINAS WEB	312

Índice de figuras

Fig. 1. 1. Sistema de suelo radiante eléctrico con placas de SSPCM propuesto por Lin et al. (2005): a) representación esquemática; b) imagen de la colocación de las resistencias eléctricas; c) disposición de las placas de PCM; d) instalación del recubrimiento superficial.....	33
Fig. 1. 2. a y b. Prototipo de suelo radiante desarrollado por Ansuini et al. (2011) para su ensayo a escala de laboratorio. c) Estructura metálica de acero galvanizado instalada en el elemento (Eurotherm, Ansuini et al. 2011).....	35
Fig. 1. 3. Sistema de suelo radiante propuesto y estudiado por Huang et al. (2014). a) Representación esquemática en sección; b) imagen de la estructura de hormigón donde se aloja el PCM macroencapsulado; c) imagen de la malla de tubos capilares superior instalada.....	36
Fig. 1. 4. Panel de techo refrescante modular desarrollado y analizado por Koschenz y Lehmann (2004). a) Croquis que representa el diseño; b) configuración del módulo antes de verter la masa de yeso con PCM microencapsulado; c) sistema de aletas de aluminio; d) prototipo desarrollado para el ensayo de laboratorio.	37
Fig. 1. 5. Croquis de la vista en sección de distintos sistemas de suelo radiante: a) módulo del sistema descrito en US7187854B2; b) elemento con panel de macrocápsulas descrito en JP2008032260A; c) suelo técnico descrito en CN201206309Y; d) sistema de instalación en seco propuesto en WO2012018254A2.	49
Fig. 1. 6. Representación del panel de techo descrito en EP1371915B1. b) vista en sección de una de las propuestas de módulo de techo refrescante propuesto en EP1470372B1.	54
Fig. 1. 7. Sistemas comerciales de calefacción o refrigeración integrados en las superficies interiores que incorporan PCM. a) Suelo radiante Autarkis-Uniwarm/Riho; b) Panel refrescante Ecophit (Grupo SGL); c) panel refrescante Ilkatherm (Ilkazel); d) Sistema de techo activo EmcoCool Smart Cooling.	65
Fig. 1. 8. Representación esquemática del dispositivo experimental utilizado en el método T-history.	68
Fig. 1. 9. Representación gráfica del algoritmo de integración numérica propuesto por Marín et al. (2003) para el cálculo de la curva entalpía-temperatura.	69
Fig. 1. 10. Evolución de la temperatura de diferentes puntos de una muestra de acetato de sodio (R=16mm) (Hong et al. 2004).	71
Fig. 1. 11. Croquis e imagen del dispositivo experimental propuesto por Palomo y Dauvergne (2011) para la caracterización de materiales sólidos compuestos con PCM.	75
Tabla 2. 1. Enumeración de los objetivos -y relación con las principales conclusiones extraídas del estado del arte- que atañen al diseño de una instalación experimental para la evaluación del funcionamiento de elementos termoactivos con PCM.....	106
Tabla 2. 2. Enumeración de los objetivos -y relación con las principales conclusiones extraídas del estado del arte- que atañen a la determinación de propiedades y análisis de características de los materiales utilizados	108

Tabla 2. 3. Enumeración de los objetivos -y relación con las principales conclusiones extraídas del estado del arte- relacionados con la simulación de elementos termoactivos con PCM.....	108
Fig. 3. 1. Interpretación gráfica de los parámetros analizados.	117
Fig. 3. 2. Análisis paramétrico: influencia de los números adimensionales en la desviación de las medidas de c_p y h_m . (cn: medida de la temperatura en el centro de la muestra; sur: medida sobre la superficie del tubo)	118
Fig. 3. 3. Análisis paramétrico: influencia en la desviación causada en el cálculo de T_m . (cn: medida de la temperatura en el centro de la muestra; sur: medida sobre la superficie del tubo).....	119
Fig. 3. 4. Correlaciones obtenidas para las desviaciones en el cálculo de c_p y h_m	120
Fig. 3. 5. Influencia, para un ensayo de fusión, del número de Biot y la temperatura adimensional en la desviación de la temperatura de cambio de fase (Superficie superior: temperatura medida sobre la superficie de la muestra; superficie inferior: temperatura medida en el centro de la muestra)	121
Fig. 3. 6. Comparación de la desviación estimada por las correlaciones (ex) y la obtenida a partir de los resultados de las simulaciones (ex).	122
Fig. 3. 7. Ejemplo de cálculo de propagación de incertidumbres a través de los cálculos del método T-history: ensayo de fusión GR27 ($T_1=15^\circ\text{C}$, $T_\infty=35^\circ\text{C}$, $\delta T_{PCM}=\delta T_{ref}=\delta T_\infty=\pm 0,15^\circ\text{C}$).	129
Fig. 3. 8. Instalación T-history utilizada para la determinación de las curvas entalpía-temperatura (Lázaro 2008).	131
Fig. 3. 9. Curvas entalpía temperatura medidas de los materiales GR27, 31 y 42.	132
Fig. 3. 10. Curvas entalpía temperatura medidas de los materiales PX27, 31 y 42.	133
Fig. 3. 11. Representación esquemática del dispositivo experimental utilizado.....	135
Fig. 3. 12. Influencia de la temperatura del aire de entrada y del caudal volumétrico en la exactitud de la medida del incremento de entalpía del PCM. (*) Cálculos realizados tomando $q=8\text{l/min}$ y $L_b=50\text{mm}$; (**) cálculos realizados con $T_{a,e}=60^\circ\text{C}$ y $L_b=50\text{mm}$	139
Fig. 3. 13. Influencia de la longitud del lecho en la exactitud y la duración del experimento. (***) Cálculos realizados para $q=8\text{l/min}$ y $T_{a,e}=60^\circ\text{C}$	140
Fig. 3. 14. Evolución de las temperaturas (izq.) y cálculo de las principales contribuciones al balance de energía (der.) correspondientes al ensayo GR31-E3.	140
Fig. 3. 15. Comparación para el compuesto GR31 de los datos experimentales obtenidos (T-history e instalación de balances de energía).	142
Fig. 3. 16. Intercomparación para el compuesto GR42 de los datos experimentales (T-history e instalación de balances de energía) con los resultados obtenidos mediante DSC ($0,5\text{K/min}$) y con los presentados en trabajos previos (Rady et al. 2009).	143
Fig. 4. 1. Imagen comparativa de los tres compuestos de mortero y PCM (GR27).	146
Fig. 4. 2. Dependencia de la densidad aparente del mortero con el porcentaje másico del material granulado con PCM (medidas experimentales y ajuste teórico).....	148
Fig. 4. 3. Disposición experimental (Lázaro et al. 2008, Zalba 2002) para reproducir las condiciones de conducción del calor unidimensional.	149
Fig. 4. 4. Evolución de la temperatura de las probetas (puntos 1 y 3) durante los ensayos.	149

Fig. 4. 5 Ajuste de las medidas experimentales de conductividad térmica.....	157
Fig. 4. 6. Influencia de la cantidad de PCM en el calor específico del compuesto.....	158
Fig. 4. 7. Comparación de los datos experimentales (25PCM-M2-EII) y numéricos.	160
Fig. 4. 8. Comparación de la capacidad de almacenamiento de los materiales analizados con algunos de los trabajos previos de Pomianowski et al. (2014), Franquet et al. (2014) y Joulin et al. (2014).	161
Fig. 4. 9. Radiador utilizado en el ensayo de goteo (UNE 23725:1990).....	162
Fig. 4. 10. Evolución temporal del porcentaje de luz transmitida durante el ensayo de medición del humo.....	164
Fig. 4. 11. Calor liberado (HRR) en función de la temperatura en los ensayos PCFC de las distintas muestras.	165
Fig. 4. 12. Horno utilizado en los ensayos a pequeña escala de resistencia al fuego	166
Fig. 4. 13. Evolución de la temperatura de ambas caras (int, ext) de las dos probetas ensayadas.....	167
Fig. 4. 14. Evolución de la temperatura de la superficie de las probetas expuesta al horno (int).....	167
Fig. 4. 15. Evaluación de la temperatura de la temperatura de la superficie protegida (ext).	168
Fig. 5. 1. Modos de transferencia de calor que intervienen en el balance de energía aplicado a las superficies exteriores e interiores de los cerramientos.	174
Fig. 5. 2. Representación geométrica del algoritmo de cálculo utilizado para determinación de las superficies interiores sobre las que incide la radiación solar directa transmitida por la ventana.....	177
Fig. 5. 3. Circuito equivalente del modelo de Oppenheim aplicado al cálculo del intercambio de radiación de onda larga (izq.). Transformación del circuito equivalente que permite la linealización del sistema de ecuaciones (der.). (Ambas representaciones se han particularizado para el caso de intercambio radiativo entre cuatro superficies).....	178
Fig. 5. 4. Representación de la reflexión y transmisión de la radiación a través de elementos con doble capa de vidrio.	180
Fig. 5. 5. Diagrama de flujo del procedimiento de análisis de los resultados del modelo. (*) pruebas realizadas para la verificación.	189
Fig. 5. 6. Imagen de la geometría básica simulada en los casos correspondientes al procedimiento BESTEST building fabric test cases (Judkoff and Neymark, 2013)...	192
Fig. 5. 7. Presentación, junto con los obtenidos en el proyecto BESTEST (Judkoff y Neymark, 1995) y calculados por Energy Plus v8, de los resultados del consumo energético en calefacción y refrigeración de los casos simulados.....	195
Fig. 5. 8. Diagramas de flujo utilizados para el diagnóstico (izq. casos de construcción ligera; der. casos con cerramientos de gran inercia térmica).....	196
Fig. 5. 9. Presentación de los resultados (consumo energético y cargas máximas) de las pruebas para el diagnóstico detallado (A1-A11).....	197
Fig. 5. 10. Presentación de los resultados de las pruebas realizadas para el diagnóstico (izq. construcción ligera; der. cerramientos con mayor inercia térmica).	197
Fig. 5. 11. Diagrama de flujo de las pruebas realizadas para la cualificación del modelo..	198
Fig. 5. 12. Representación gráfica del análisis realizado para la cualificación del modelo.	198

Fig. 5. 13. Representación de los modelos bidimensionales utilizados.....	200
Fig. 5. 14. Representación esquemática de modelo unidimensional de suelo radiante.	202
Fig. 5. 15. Definición de los parámetros geométricos de los sistemas de suelo radiante utilizados en los modelos.....	203
Fig. 5. 16. Representación esquemática del modelo de elemento activo de Koschenz y Lehmann (2000).....	204
Fig. 5. 17. Gradiente vertical de la temperatura promedio calculada sobre la dirección horizontal obtenida por el modelo 2D (malla ortogonal) y el unidimensional (R_x)...	206
Fig. 5. 18. Comparación de la respuesta dinámica obtenida por los tres modelos durante el proceso de puesta en marcha aplicado al suelo radiante sin PCM. (*) La potencia de refrigeración consumida por el suelo radiante se expresa, de la misma manera que la suministrada por el elemento al ambiente interior, por unidad de superficie de suelo.	208
Fig. 5. 19. Comparación de la respuesta dinámica obtenida por los tres modelos durante el proceso de puesta en marcha aplicado al suelo radiante con PCM.....	208
Fig. 5. 20. Comparación de la respuesta dinámica obtenida por los tres modelos durante el proceso de descarga aplicado al suelo radiante con PCM.	209
Fig. 5. 21. Comparación de la respuesta dinámica calculada por los modelos 1D y 2D (malla ortogonal).....	212
Fig. 5. 22. Comparación de la variación de entalpía promedio de la losa de suelo radiante, en función de la temperatura del agua.....	214
Fig. 5. 23. Comparación de distintos coeficientes de convección propuestos en trabajos anteriores.....	216
Fig. 5. 24. Evolución de la temperatura interior de los casos analizados.....	217
Fig. 5. 25. Comparación de los resultados de ambos modelos para la simulación del funcionamiento del sistema de suelo radiante sin PCM integrado en los cubículos experimentales definidos en el capítulo 7.	218
Fig. 5. 26. Comparación de los resultados de ambos modelos para la simulación del funcionamiento del sistema de suelo radiante con un 10% de PCM integrado en los cubículos experimentales definidos en el capítulo 7.....	218
Fig. 5. 27. Comparación de los resultados de ambos modelos para la simulación del funcionamiento del sistema de suelo radiante con un 25% de PCM integrado en los cubículos experimentales definidos en el capítulo 7.....	219
Fig. 6. 1. Intervalo de confianza para la estimación de la desviación típica y la media según el tamaño –número de simulaciones- de la muestra aleatoria.....	228
Fig. 6. 2. Esquema constructivo del cubículo experimental (Castell et al. 2010).	229
Fig. 6. 3. Representación de las curvas entalpía-temperatura (fusión y solidificación) medidas mediante el método T-history (Universidad de Zaragoza, Lázaro et al. 2006).	230
Fig. 6. 4. Representación gráfica de la función analítica utilizada y de los parámetros considerados.....	231
Fig. 6. 5. Representación conjunta de la curva h-T analítica y su aproximación numérica introducida en EnergyPlus.....	233
Fig. 6. 6. Consumo energético mensual de los cubículo: sin PCM y con 2cm de PCM.....	235

Fig. 6. 7. Representación conjunta del ahorro energético mensual debido al efecto del cambio de fase y de la temperatura promedio del PCM.....	236
Fig. 6. 8. Histograma de frecuencias relativas del consumo energético de refrigeración (2cm PCM).....	237
Fig. 6. 9. Análisis de sensibilidad (SRC) en los dos casos de estudio planteados: (a) 1cm PCM; (b) 2cm PCM.....	239
Fig. 6. 10. Conjunto de SRC ampliado (inclusión de los principales términos de segundo orden).....	241
Fig. 6. 11. Influencia de la temperatura (e intervalo térmico) de cambio de fase en el consumo energético anual de refrigeración.	242
Fig. 6. 12. Comparación de los resultados del análisis de sensibilidad (SRC) para los casos original y con la temperatura de cambio de fase óptima (1cm PCM).....	243
Fig. 6. 13 a) representación por medio de un diagrama de bloques del algoritmo propuesto; b) representación de los resultados del algoritmo (caso particular 1cm de PCM).....	245
Fig. 7. 1. Imagen del suelo radiante con PCM granulado montado en la instalación experimental desarrollada (Montilla, Córdoba) en el contexto del proyecto SOLTES. a) Distribución de los tubos de agua; b) recrecido, en fresco, realizado con el compuesto de mortero y suelo radiante.....	249
Fig. 7. 2. Representación del cubículo experimental analizado.....	251
Fig. 7. 3. Ajuste, particularizado para el material GR27, de la expresión analítica de la curva h-T.	253
Fig. 7. 4. Criterio propuesto para la compensación de la emisión térmica del sistema de suelo radiante a través de la modificación de la distancia entre tubos.	257
Fig. 7. 5. Gráfico de la frecuencia relativa acumulada del promedio diario de la demanda horaria de calefacción por unidad de superficie [$W \cdot h/m^2$] durante el periodo de cálculo (1 de noviembre-28 de febrero, Córdoba).....	258
Fig. 7. 6. Comparativa entre el funcionamiento del sistema de suelo radiante con y sin PCM (25% GR27, 26 de enero, Córdoba).....	259
Fig. 7. 7. Evolución de la potencia consumida y suministrada por ambos sistemas de suelo radiante durante el día completo (26 de enero, Córdoba).	260
Fig. 7. 8. Representación, para ambas placas de suelo radiante (sin PCM y 25% de GR27), de la energía térmica almacenada y la temperatura promedio calculadas durante un día completo (26 de enero, Córdoba).....	261
Fig. 7. 9. Comparación del funcionamiento, durante el día invernal seleccionado (26 de enero, Córdoba), calculado con los materiales GR27 y GR31 (25% en masa).....	262
Fig. 7. 10. Variación durante el día de estudio (26 de enero, Córdoba) de la energía térmica de la placa de mortero de suelo radiante en los dos sistemas analizados (GR27 y GR31, 25% en masa).....	262
Fig. 7. 11. Comparativa entre el funcionamiento del sistema de suelo radiante con y sin PCM (25% GR27, 20 de diciembre, Córdoba).....	264
Fig. 7. 12. Gráfico de frecuencia relativa acumulada de la temperatura operativa interior (periodo de cálculo: 1 de noviembre-28 de febrero, Córdoba).....	264
Fig. 7. 13. Relación entre el promedio temperatura operativa durante las horas centrales del día (12-16h) y la demanda de calefacción media del mismo periodo (1 de noviembre-28 de febrero, Córdoba).	265

Fig. 7. 14. Representación de la frecuencia acumulada de la temperatura operativa interior (periodo de cálculo: 1 de noviembre-28 de febrero; datos climáticos: Zaragoza).	266
Fig. 7. 15. Influencia del contenido de PCM (porcentaje másico) en el consumo energético (1 de noviembre- 28 de febrero; datos climáticos: Córdoba).	267
Fig. 7. 16. Influencia del contenido de PCM (porcentaje másico) en el consumo energético (1 de noviembre- 28 de febrero; datos climáticos: Zaragoza).	267
Fig. 7. 17. Dependencia del ahorro económico en el coste de la energía eléctrica consumida con el porcentaje másico de PCM en la placa de mortero.	270
Fig. 7. 18. Representación de la eficacia (f_{ef}) del almacenamiento térmico adicional del sistema de suelo radiante con PCM para evitar el consumo de energía durante las horas de demanda punta.	272
Fig. 7. 19. Representación de la eficacia del uso de la capacidad adicional de almacenamiento (f_{ef}) y del número adimensional relacionado con el periodo de retorno (PR^*) en función de la cantidad de PCM.	273
Fig. 7. 20. Influencia de la relación entre el precio del PCM (p_{PCM}) y de los áridos del mortero (p_{ar}) en la cantidad del material de almacenamiento térmico que optimiza la inversión.	274
Fig. 7. 21. Dependencia del periodo de retorno de la inversión en función del precio por kilogramo de PCM a partir de los resultados de ambas simulaciones.	275
Fig. 7. 22. Cuantificación de la sensibilidad (SRC) del coste y el ahorro en la energía eléctrica consumida.	280

Índice de tablas

Tabla 1. 1. Resumen de los principales aspectos de las publicaciones sobre la aplicación de los PCM en elementos termoactivos.	43
Tabla 1. 2. Listado y breve resumen de las patentes localizadas que describen sistemas de suelo radiante eléctrico con PCM. (*) Sin especificar, la patente no concreta información acerca de este aspecto.	48
Tabla 1. 3. Listado y breve resumen de las patentes localizadas que describen sistemas de suelo radiante con PCM.	52
Tabla 1. 4. Listado y breve resumen de las patentes localizadas que describen sistemas de techo y paredes activos con PCM.	53
Tabla 1. 5. Principales características de los materiales compuestos con PCM utilizados en el ámbito de la construcción.	62
Tabla 1. 6. Recopilación de materiales y sistemas comercializados que permiten la inclusión de PCM en la edificación.	64
Tabla 1. 7. Relación de elementos de construcción termoactivos con PCM actualmente comercializados o propuestos por los fabricantes.	66
Tabla 1. 8. Resumen de los trabajos en los que se emplea un dispositivo de placa caliente para la determinación de las propiedades ligadas al almacenamiento térmico.	74
Tabla 1. 9. Principales características de los métodos de cálculo aplicados para la simulación de elementos de construcción activa.	83
Tabla 1. 10. Relación de los modelos desarrollados en el entorno de programas de simulación energética de edificios.	88
Tabla 1. 11. Relación de los modelos de elementos de construcción activa integrados en los principales programas de simulación energética de edificios.	92
Tabla 1. 12. Relación de modelos de elementos de construcción activa con PCM.	98
Tabla 1. 13. Principales características de las alternativas de diseño identificadas a través de la revisión de artículos de investigación y patentes.	101
Tabla 2. 1. Enumeración de los objetivos -y relación con las principales conclusiones extraídas del estado del arte- que atañen al diseño de una instalación experimental para la evaluación del funcionamiento de elementos termoactivos con PCM.	106
Tabla 2. 2. Enumeración de los objetivos -y relación con las principales conclusiones extraídas del estado del arte- que atañen a la determinación de propiedades y análisis de características de los materiales utilizados	108
Tabla 2. 3. Enumeración de los objetivos -y relación con las principales conclusiones extraídas del estado del arte- relacionados con la simulación de elementos termoactivos con PCM.	108
Tabla 3. 1. Definición de las principales variables adimensionales asociadas al problema definido.	111
Tabla 3. 2. Correlaciones y límites para los errores producidos en las medidas del método T-history.	123
Tabla 3. 3. Comparativa entre las características de las medidas en el centro y la superficie de la muestra.	124

Tabla 3. 4. Generalización de los resultados para el ensayo de PCM convencionales: obtención de límites teóricos para los errores.	125
Tabla 3. 5. Sensibilidad de la medida de variación de entalpía y calor específico respecto a los errores en la medida de temperatura del sensor.....	128
Tabla 3. 6. Resumen de las medidas realizadas en la instalación de T-history.....	132
Tabla 3. 7. Magnitudes medidas en la instalación utilizada para el estudio del balance de energía en el intercambio de energía térmica entre lechos de gránulos con PCM y aire.	135
Tabla 3. 8. Resultados en los ensayos realizados en la instalación de balances de energía.	141
Tabla 3. 9. Resumen del análisis de propagación de incertidumbres y de sensibilidad realizado sobre los datos experimentales del ensayo T1-GR31.....	141
Tabla 4. 1. Composición en seco de las muestras de mortero.....	146
Tabla 4. 2. Medida de la densidad aparente de las probetas.	147
Tabla 4. 3. Medidas de la difusividad térmica de las probetas. (*) Coeficiente de correlación y errores asociados al ajuste que del modelo al conjunto de temperaturas registradas durante el periodo de análisis (t_1 , t_2).	152
Tabla 4. 4. Resumen del análisis de propagación de incertidumbres a través del algoritmo de tratamiento de datos empíricos.....	153
Tabla 4. 5. Resumen de las medidas realizadas en el ICMA con el equipo TCi a las probetas de mortero. (*) El calor específico se calcula a partir de las medidas de conductividad, efusividad (TCi) y densidad aparente (sección 4.3).	155
Tabla 4. 6. Resumen de las propiedades termofísicas de los morteros analizados.....	155
Tabla 4. 7. Relación de modelos utilizados para la predicción de la conductividad térmica.	156
Tabla 4. 8. Principales datos de los ajustes obtenidos con cada modelo.....	157
Tabla 4. 9. Incertidumbre de las variables de entrada introducidas en el modelo.....	159
Tabla 4. 10. Propiedades de morteros y hormigones con PCM microencapsulado presentados en los trabajos anteriores de Pomianowski et al. (2014), Franquet et al. (2014) y Joulin et al. (2014).	160
Tabla 4. 11. Resultados del ensayo de goteo (UNE 23725:1990).....	163
Tabla 4. 12. Resultados de los ensayos realizados con el PCFC.....	165
Tabla 5. 1. Lista de aspectos que, en relación a las posibilidades que ofrecen los programas de simulación energética de edificios, podrían ser incluidos en posteriores desarrollos del modelo.	184
Tabla 5. 2. Resumen y comparativa de los modelos de transferencia de calor utilizados en la herramienta de simulación desarrollada con los de algunos programas de simulación.	186
Tabla 5. 3. Casos BESTEST para el diagnóstico (Judkoff y Neymark, 1995) utilizados en este trabajo.....	193
Tabla 5. 4. Casos BESTEST para la cualificación de los modelos (Judkoff y Neymark, 1995) utilizados en este trabajo. (*) control horario de temperatura programado; (**) control horario de temperatura y ventilación programado.....	193
Tabla 5. 5. Métodos utilizados para la discretización de la variación de entalpía.	201
Tabla 5. 6. Datos de entrada utilizados en la intercomparación de los modelos.....	203

Tabla 5. 7. Comparación del flujo de calor sobre la superficie del suelo calculado en situaciones estacionarias (cc. Fourier y Dirichlet).....	205
Tabla 5. 8. Influencia del método de discretización temporal en el cálculo del balance de energía, aplicado sobre el dominio del problema durante el proceso completo de puesta en marcha.....	207
Tabla 5. 9. Resumen de las desviaciones (error cuadrático medio) calculadas en la potencia suministrada y consumida durante los procesos de puesta en marcha y de descarga.	209
Tabla 5. 10. Resumen del análisis de las desviaciones producidas por el modelo 1D.	212
Tabla 5. 11. Recopilación de los trabajos experimentales y numéricos dedicados a la determinación de los coeficientes de transferencia de calor (radiación y convección natural) sobre superficies interiores con sistemas de calefacción o refrigeración integradas. (*) No se presentan en tabla las correlaciones para el cálculo del coeficiente de convección indicadas ya que el sistema físico no se corresponde con el del suelo radiante.	215
Tabla 5. 12. Tabla resumen sobre las desviaciones producidas en la respuesta térmica de ambos modelos de suelo radiante (1D y 2D).....	219
Tabla 6. 1. Tabla resumen de los trabajos publicados sobre la aplicación del análisis de sensibilidad y de propagación de incertidumbres a sistemas con PCM.	225
Tabla 6. 2. Propiedades termofísicas del PCM y rango de incertidumbre asociado.	230
Tabla 6. 3. Análisis de la influencia de la discretización en los resultados numéricos (caso 2cm de PCM).	234
Tabla 6. 4. Resumen del consumo y ahorro energético de los casos analizados.	236
Tabla 6. 5. Resumen del análisis estadístico de los resultados.	237
Tabla 6. 6. Comparación de la propagación de incertidumbres entre los casos original ($T_m=26^\circ$, 2cm PCM) y con la temperatura de cambio de fase óptima ($T_m=24,8^\circ$, 2cm PCM).	242
Tabla 6. 7. Incertidumbre del consumo y ahorro anual de refrigeración en los casos analizados.....	243
Tabla 6. 8. Incertidumbre requerida para la medida de las propiedades termofísicas del PCM.	246
Tabla 7. 1. Propiedades termofísicas de los materiales analizados (CTE). (*) Las propiedades del material compuesto de mortero y PCM se calculan mediante los modelos ajustados en el capítulo 3.....	251
Tabla 7. 2. Espesores exigidos para la placa de recrecido sobre los tubos de suelo radiante según distintas normas vigentes en Europa (EN 1264-4, NF DTU 65.14, DIN 18560).	252
Tabla 7. 3. Expresiones correspondientes al ajuste de las medidas experimentales (ρ_{m-PCM} , λ_{m-PCM}) y a la predicción teórica (h_{m-PCM}) utilizadas para describir la variación de las propiedades del material compuesto con el contenido en PCM granulado.....	252
Tabla 7. 4. Ajustes obtenidos para la expresión analítica de la curva h-T.....	253
Tabla 7. 5. Tramos horarios y precios de la tarifa con discriminación horaria considerada en el capítulo (2.0DHA).....	254
Tabla 7. 6. Temperaturas de consigna para la temperatura del aire interior y la de suministro de la bomba de calor según el tramo horario.....	255

Tabla 7. 7. Resumen de los resultados de la simulación del cubículo experimental durante un periodo invernal completo (1 de noviembre-28 de febrero).....	263
Tabla 7. 8. Consumos energéticos y ahorros calculados para las dos configuraciones (1 de noviembre- 28 de febrero; datos climáticos: Córdoba).	268
Tabla 7. 9. Consumos energéticos y ahorros calculados para las dos configuraciones (1 de noviembre- 28 de febrero; datos climáticos: Zaragoza)	268
Tabla 7. 10. Determinación de la incertidumbre de los parámetros de la curva h-T relacionados con el intervalo de temperaturas de cambio de fase (T_m y ΔT_m).	278
Tabla 7. 11. Listado de variables aleatorias independientes consideradas en el análisis de propagación de incertidumbres.....	279
Tabla 7. 12. Resumen de los resultados e incertidumbres asociadas durante el periodo de cálculo (1 de enero-31 de enero, Córdoba).....	279
Tabla 7. 13. Presentación y comparación con los errores asociados a las medidas realizadas en esta tesis de la combinación de incertidumbres que permite reducir la desviación en el cálculo del ahorro económico hasta un $\pm 8\%$	281

Nomenclatura

Letras latinas

A	Superficie [m ²]
AUST	Temperatura media radiante vista desde la superficie del elemento activo [K]
a _b	Compacidad lecho [m ⁻¹]
Bi	Número de Biot
c _p	Calor específico [J/(kg·K)]
C	Capacidad calorífica [J/K]
C _r	Capacidad calorífica relativa de la muestra
D, d	Diámetro [m]
e	Error relativo, espesor [m] Efusividad térmica [J/(K·m ² ·s ^{1/2})]
f	Fracción líquida del PCM
F _{ij}	Factor de vista
Fo	Número de Fourier
G	Irradiación total [W/m ²]
h	Entalpía [kJ/kg], Coeficiente de transferencia de calor [W/(m ² ·K)]
h _c	Coeficiente equivalente convección [W/(m ² ·K)]
h _{c-r}	Coeficiente equivalente convección-radiación [W/(m ² ·K)]
h _m	Entalpía de cambio de fase [kJ/kg]
I	Integral en el tiempo de la diferencia de temperaturas (T _∞ -T) (método T-history)
J	Radiosidad total [W/m ²]
J ₀	Función de Bessel de primera especie de orden cero
J ₁	Función de Bessel de primera especie de primer orden
L	Longitud
m	Masa [kg]
ṁ	Caudal másico [kg/s]
n	Índice de refracción
N	Tamaño de muestra
Nu	Número de Nusselt
p	Precio unitario
q	Flujo de calor [W/m ²]
r	Variable radial (coordenadas cilíndricas) [m]
R	Radio [m] Resistencia térmica [m ² ·K/W]
R ²	Coeficiente de correlación
Ra	Número de Rayleigh
S _{δx}	Sensibilidad con respecto al parámetro x
t	Tiempo [s]
T	Temperatura [°C]

T_m	Temperatura de cambio de fase [°C]
Ste	Número de Stefan
V	Volumen [m ³]
\dot{V}	Caudal volumétrico [m ³ /s]
x	Variable de entrada Componente espacial de las coordenadas cartesianas [m]
x_{PCM}	Fracción másica del PCM
y	Variable de salida Componente espacial de las coordenadas cartesianas [m]
z	Componente espacial de las coordenadas cartesianas [m]

Letras griegas

α	Difusividad térmica [m ² /s]
A	Absortividad
β	Coefficiente de regresión
Δ	Incremento
δ	Desviación
ΔT_m	Rango de temperaturas de cambio de fase [°C]
ε	Emisividad Eficiencia
θ	Temperatura adimensional Ángulo de incidencia [rad]
$\theta_{h,solar}$	Altura solar [rad]
λ	Conductividad térmica [W/(m·K)]
ξ	Valor propio (ecuación trascendente)
ρ	Densidad [kg/m ³] Reflectividad
P	Reflectividad
σ	Desviación típica Constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma=5,67 \cdot 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$)
T	Transmisividad
ϕ	Ángulo refractado [rad]
ϕ_{PCM}	Fracción volumétrica del PCM

Subíndices

0	Relativo a las condiciones iniciales
∞	Relativo al entorno
a	Relativo al aire
ar	Relativo a los áridos del mortero
b	Lecho
BC	Relativo a la bomba de calor
cn	Centro de la muestra
conv	Relativo a la convección
c-r	Relativo al fenómeno conjunto de convección y radiación

dif	Radiación difusa
dir	Radiación directa
e	A la entrada
ext	Exterior
hor	Relativo a la radiación sobre superficie horizontal
int	Interior
m	Relativo al cambio de fase
	Relativo al mortero
ms	Medida (<i>measure</i>)
m-PCM	Relativo al compuesto de mortero y PCM
p	Partícula
PCM	Relativo al PCM
r	Relativo a la radiación
ref	Relativo al material de referencia
s	A la salida, Relativo a la muestra (<i>sample</i>)
	Relativo al suelo radiante
sup	Relativo a la superficie
t	Relativo al recipiente (tubo)
w	Agua

Acrónimos

ACH	Tasa horaria de renovación de aire [h^{-1}]
BS	Estearato de butilo (<i>Butyl Stearate</i>)
DSC	Calorimetría diferencial de barrido (<i>Differential Scanning Calorimetry</i>)
FAST	<i>Fourier Amplitude Sensitivity Analysis</i>
HDPE	Polietileno de alta densidad (<i>High Density Polyethylene</i>)
HRR	Tasa de liberación de calor (<i>Heat Release Rate</i>)
HRC	Capacidad de liberación de calor (<i>Heat Release Capacity</i>)
LFA	Laser Flash Apparatus
LHS	Muestreo mediante hipercubo latino (<i>Latin Hypercube Sampling</i>)
LW	Relativo a la radiación de onda larga (<i>Long Wave</i>)
NRMSD	Error cuadrático medio normalizado (<i>Normalized Root Mean Square Deviation</i>)
NTU	Número de unidades de transferencia de calor (<i>Number of Transfer Units</i>)
PCM	<i>Phase Change Material</i>
PE	Polietileno
PEG	Polietilenglicol
PCFC	Calorímetro de flujo de combustión por pirolisis (<i>Pirolisis Combustion Flow Calorimeter</i>)
PHRR	Valor máximo de la tasa de liberación de calor (<i>Peak Heat Release Rate</i>)
PR	Periodo de retorno
PU	Poliuretano
RMSD	Error cuadrático medio (<i>Root Mean Square Deviation</i>)
SSPCM	Material de cambio de fase de estructura sólida (<i>Shape Stabilized Phase Change Material</i>)
SRC	Coefficiente de regresión normalizado (<i>Standardized Regression Coefficient</i>)

SW	Relativo a la radiación de onda corta (<i>Short Wave</i>)
TABS	Elemento de construcción térmicamente activo (<i>Thermally Active Building System</i>)
THR	Energía térmica total liberada (<i>Total Heat Release</i>)
TMA	Análisis termo-mecánico (<i>Thermo-mechanical analysis</i>)
TTI	Tiempo hasta la primer ignición (<i>Time To Ignition</i>)

Agradecimientos

Quisiera, en primer lugar, agradecer su ayuda a todas las personas que han formado parte de esta tesis doctoral y la han hecho posible.

A mis directores, Belén Zalba y José María Marín debo mi formación y el apoyo para la realización de este trabajo; sin sus consejos, generosidad y disponibilidad nunca hubiera podido llevarse a cabo.

Quiero expresar mi gratitud, también, a los miembros del tribunal evaluador por haber aceptado formar parte de él y por sus aportaciones, que sin duda enriquecerán el análisis realizado y ampliarán sus perspectivas.

Al grupo GITSE por haberme permitido formar parte de él y por el buen trato que desde el principio recibí de cada uno de ellos, especialmente de Luis; y a mis compañeros Conchita, Pablo, Ana, Mónica, Inés, Mateo, Nuria, Sergio y Rubén por haberme acompañado en esta etapa ayudándome desde sus inicios. Gracias a su estímulo he podido desarrollar este trabajo, pues hemos compartido momentos de concentración y de diversión, de los que siempre voy a guardar grandes recuerdos.

A la Diputación General de Aragón agradezco la beca para la Formación de Personal Investigador y a CIATESA, especialmente a Miguel Zamora y Natividad Molero, su disponibilidad y colaboración. A Laia Haurie y a Dieter Boer doy gracias por el trabajo compartido y a Miguel Castro por su atención y su ayuda.

Quiero agradecer el apoyo de mi familia, especialmente de mis padres, que han sido el principal soporte durante todos estos años, pues sin su aliento nunca hubiera concluido esta etapa. Su paciencia conforma más de la mitad de esta tesis y sus ánimos han sido el impulso necesario para haberla terminado con ilusión.

A mi hermana Gloria debo su gran ayuda, incondicional y práctica al mismo tiempo, no sólo en los aspectos de diseño sino, sobre todo, en el ámbito personal, pues ha estado siempre presente, escuchándome y animándome.

A mis tíos y a mis abuelos por compartir preocupación y alegrías y por el cariño que me han brindado siempre, y a Julián y a Esperanza por haberme guiado en la etapa final y por haber invertido buena parte de su tiempo en ayudarme, motivarme y apoyarme.

A Diana que, aparte de la ayuda que me ha prestado en tantos aspectos de la tesis, ha sido mi principal apoyo. Ha hecho suyos tanto mis buenos como mis malos momentos en esta etapa, pero, por encima de todo, llena siempre de luz cada día. Y, finalmente, a Sofía, nuestra niña, que, sin saberlo, ya nos hace felices mientras la esperamos.

Resumen

Esta tesis doctoral aborda el estudio de diferentes aspectos relacionados con el análisis del comportamiento de los elementos de construcción termoactivos con materiales de cambio de fase (en adelante PCM, del inglés *Phase Change Material*). De una forma general, las aplicaciones en las que se incorporan estas sustancias a los elementos de construcción se pueden clasificar en activas y pasivas. Por una parte, mediante su integración en elementos pasivos del edificio, se persigue el objetivo de mejorar su comportamiento, a través de un incremento sustancial de su inercia térmica, de manera que se logren ciertas reducciones en el consumo energético de calefacción y refrigeración o se mejoren las condiciones de confort.

Por otra parte, se consideran aplicaciones activas aquéllas en las que los procesos de almacenamiento y liberación de la energía térmica son controlados -generalmente mediante la circulación de un fluido caloportador- de manera que el elemento con PCM se constituye como un componente para el almacenamiento térmico integrado en el sistema de climatización del edificio. De este modo, pueden facilitar la integración de energías renovables o propiciar estrategias de operación más eficientes. Concretamente, la tesis se centra en los sistemas de calefacción y refrigeración por agua integrados en las superficies interiores del edificio (tales como los suelos radiantes). Esta familia de sistemas presenta la ventaja adicional de operar bajo pequeños gradientes de temperatura entre el agua de impulsión y el ambiente interior, lo cual puede mejorar la eficiencia de los equipos térmicos o permitir la integración de fuentes de baja exergía.

El trabajo de esta tesis parte de la revisión y análisis de los artículos de investigación y patentes relacionados con las principales líneas de trabajo involucradas en el desarrollo de estos elementos: estudio de aplicaciones, desarrollo de materiales, determinación de propiedades y simulación de su comportamiento. Por un lado, esta labor ha permitido la formulación de los objetivos de la tesis, atendiendo a los puntos de interés que se han identificado, y, por otra parte, la información recopilada y analizada ha sido útil para el planteamiento y pre-diseño del sistema activo con PCM que se analiza en esta tesis. De este modo, se ha propuesto el estudio de un suelo radiante en el que se añade el PCM, impregnado en gránulos de material poroso, al mortero que forma la capa de recredido sobre los tubos de agua.

En un primer bloque, el trabajo se ocupa de la determinación de las propiedades termofísicas del material de construcción con PCM seleccionado para la aplicación activa. Estas propiedades constituyen una información fundamental para las posteriores simulaciones. Se ha propuesto el método T-history para la determinación de la curva entalpía-temperatura de los materiales que se incorporan al mortero de suelo radiante. Además, se ha realizado un estudio teórico que ha permitido la cuantificación y la predicción de las desviaciones que el procedimiento experimental produce cuando se aplica a este tipo de compuestos sólidos. En la determinación de las propiedades se ha prestado especial

atención al cálculo del error asociado, ya que es una información complementaria acerca de la calidad de las medidas que debe ser considerada en los siguientes análisis.

Asimismo, gracias a la colaboración del Laboratorio del Fuego de la Escuela Politécnica de la Edificación de Barcelona (Universidad Politécnica de Cataluña) se han realizado unos primeros ensayos del comportamiento frente al fuego de los materiales analizados. Éste es un aspecto crítico en la incorporación PCM orgánicos en la construcción que puede condicionar la viabilidad técnica de los sistemas.

En el segundo bloque, el trabajo se ha dedicado a la elaboración de herramientas numéricas para la simulación de estos elementos termoactivos dentro del edificio. Durante el periodo de realización de la tesis, la escasez de modelos que, integrados dentro de los programas de simulación energética de edificios habitualmente aceptados, permitieran estos cálculos, motivó la necesidad de desarrollar una herramienta propia. Una parte importante de este esfuerzo se ha invertido en contrastar sus resultados con el objetivo de conferir mayor fiabilidad a los análisis teóricos que se presentan. Con este propósito, se ha adaptado la metodología BESTEST (Judkoff y Neymark, 1995) para la intercomparación del módulo que simula el edificio. Además, las herramientas desarrolladas para la simulación del suelo radiante han sido contrastadas con respecto a un programa, que basando su procedimiento de cálculo en el método de volúmenes finitos, permite el estudio detallado de la transferencia de calor en este sistema.

Al mismo tiempo, dentro de este ámbito relacionado con la simulación, se ha establecido el objetivo de contemplar en las simulaciones la incertidumbre asociada a las medidas de las propiedades de los materiales con PCM, que puede ser, por diversos motivos, significativa. En este sentido, se ha propuesto la aplicación de los análisis de sensibilidad y propagación de errores basados en los métodos Montecarlo, cuyo uso, que está más extendido dentro del ámbito de la simulación energética de edificios, no es tan frecuente en el estudio de sistemas con PCM. Además, a partir de los resultados acerca de la sensibilidad de los errores en los resultados numéricos, se ha elaborado un procedimiento sencillo para el análisis crítico de la adecuación de la exactitud de cada medida para su utilización, como dato de entrada, en la simulación de una aplicación concreta.

Finalmente, se ha realizado un estudio numérico, utilizando las herramientas de simulación desarrolladas, sobre el comportamiento del elemento activo con PCM propuesto se instala en un cubículo experimental. Este trabajo ha comprendido el estudio de las características del funcionamiento del sistema, así como el análisis de la influencia de los principales parámetros que intervienen en su diseño. Los resultados se han utilizado para el dimensionamiento de una instalación experimental para el ensayo de estos componentes activos. El estudio teórico ha mostrado cómo el sistema con PCM es capaz de almacenar y liberar, a lo largo del ciclo diario de funcionamiento, más del doble de energía térmica que un sistema análogo convencional. En la aplicación concreta analizada, en la que se trata de desplazar a las horas valle de la demanda eléctrica el consumo en calefacción de una bomba de calor, esta mejora en la capacidad de almacenamiento térmico se traduce en ahorros de hasta el 15% en el coste de dicho consumo. Por otro lado, el estudio identifica el desarrollo e implementación de algoritmos más avanzados de control como una de las líneas que puede contribuir de manera significativa a la mejora de la operación de estos sistemas.

Introducción

En la actualidad existe un creciente interés por la reducción del consumo y por la mejora de la eficiencia energética de los edificios. Además, el hecho de que hoy su consumo suponga aproximadamente el 40% del global de energía primaria en los países desarrollados lo convierte en uno de los sectores clave sobre los que aplicar este tipo de estrategias. Dentro del marco legislativo europeo, este interés queda plasmado en la directiva 2012/27/UE sobre eficiencia energética y, más concretamente, en la 2010/31/EU -centrada en el ámbito de los edificios-. Esta última exige, entre otros aspectos, el establecimiento de unos requisitos mínimos para la eficiencia energética tanto para los edificios como para sus instalaciones de climatización, e insta a que a partir del año 2020 todos los edificios de nueva construcción sean de consumo de energía casi nulo.

El almacenamiento térmico con materiales de cambio de fase¹ dentro de la edificación puede contribuir tanto a la reducción del consumo de energía como a la mejora de su eficiencia. Por un lado, incorporados a los elementos de construcción pueden lograr, gracias al incremento de la inercia térmica asociado al almacenamiento de energía latente, la atenuación de la oscilación térmica en los espacios interiores -mejorando en consecuencia las condiciones de confort-. Por otro lado, permiten la reducción del consumo energético y la mitigación de las demandas máximas de climatización en el edificio.

Este uso de los PCM en los edificios se denomina “pasivo”, considerando que los procesos de absorción y liberación de energía térmica se activan en estas aplicaciones por medio de los fenómenos de transferencia de calor habituales en los elementos de construcción (p. ej. la conducción del calor a través de los cerramientos o la incidencia de radiación solar), de manera que no es posible efectuar una acción de control directa sobre ellos.

Por otra parte, se consideran aplicaciones activas de estos materiales aquellas en las que estos procesos pueden ser controlados, generalmente mediante la circulación de un fluido caloportador, de manera que el elemento con PCM se constituya como un componente para el almacenamiento térmico integrado en el sistema de climatización del edificio. Algunos ejemplos de estas aplicaciones son los sistemas de fachadas ventiladas con PCM (De Gracia et al. 2013a y 2013b), los suelos radiantes (Lin et al. 2005, Zeng et al. 2010) o los techos refrescantes con PCM (Koschenz y Lehmann, 2004).

Concretamente, esta tesis se centra en los sistemas de calefacción y refrigeración de circulación de agua, integrados en las superficies interiores en edificios (tales como los suelos radiantes y techos refrescantes) que incorporan almacenamiento de energía térmica latente. La principal característica de estos componentes es su capacidad de suministrar una potencia de climatización sensible moderada cuando se someten a un gradiente de temperaturas bajo entre el fluido caloportador y el ambiente interior. Este hecho propicia la mejora en la eficiencia de la operación de los equipos de producción de calor o frío y facilita la integración de fuentes energética de baja exergía. Adicionalmente, la incorporación

¹ En adelante PCM, del inglés *Phase Change Materials*.

de PCM a estos sistemas aumenta notablemente su capacidad de almacenamiento térmico, lo que posibilita su operación bajo estrategias que permitan el aumento de la eficiencia de los equipos, reduzcan el coste de operación o faciliten la integración de fuentes de energía renovables, tales como la energía solar o refrigeración gratuita.

Tanto en su principio de operación como en su capacidad para almacenar energía térmica, estos elementos resultan similares a los denominados “sistemas de construcción termoactivos”, también conocidos como TABS (Thermally Active Building Systems) (Lehmann et al. 2007). Estos elementos de climatización aprovechan la inercia térmica de los elementos de construcción -generalmente de los forjados- mediante la circulación de un fluido caloportador a través de conductos que son instalados durante el proceso de conformación de la estructura del edificio. En los últimos años, el uso de estos sistemas se ha popularizado en el centro y norte de Europa, principalmente debido a su alta eficiencia y bajo coste de inversión. Aunque la integración de estos sistemas en edificios de nueva construcción implica un coste de inversión adicional reducido, su aplicación en obras de rehabilitación resulta más problemática. En estos casos, el uso del PCM puede resultar una alternativa atractiva, dado que con un pequeño espesor del material se pueden lograr capacidades de almacenamiento térmico equivalentes a las de los elementos estructurales (Koschenz y Lehmann, 2004).

Pese a que existe un importante número de trabajos publicados en relación con el análisis teórico y experimental de elementos de construcción pasivos con PCM (Soares et al. 2013), no son tan abundantes los dedicados a su inclusión en componentes activos. En estos últimos, el PCM se ha utilizado con distintos propósitos: nivelación de la demanda, uso de la energía solar para calefacción y estabilización de la temperatura.

De un modo general, todos los estudios coinciden en que el PCM proporciona una capacidad de almacenamiento de energía térmica que permite su uso en aplicaciones donde existe un desfase temporal entre el suministro y la demanda de energía. Asimismo, en trabajos como los de Zeng et al. (2010) y Ansuini et al. (2011) se muestra el potencial de estos sistemas para mantener la temperatura dentro del rango de confort a lo largo de un ciclo diario en el que se produce el almacenamiento y la liberación de la energía térmica.

Sin embargo, no en todos los sistemas propuestos se han obtenido resultados plenamente satisfactorios: en algunos casos, la oscilación térmica de la temperatura interior superaba el rango de confort (Lin et al. 2005 y Cheng et al. 2015). Estos aspectos negativos del funcionamiento de los sistemas pueden estar directamente relacionados con su diseño térmico y dimensionado. Desde este punto de vista, la selección del PCM con una adecuada temperatura de cambio de fase, la determinación de la capacidad de almacenamiento y la eficiencia de la transferencia de calor entre el elemento que almacena la energía térmica y el ambiente interior, pueden identificarse como los principales factores para el diseño de estos sistemas.

Así pues, el trabajo de esta tesis se centra en aspectos que intervienen en el análisis y diseño de elementos de construcción con PCM, ligados fundamentalmente a la determinación de las propiedades del material y a su estudio teórico a través de la simulación.

En primer lugar, la determinación de las propiedades termofísicas proporciona una información fundamental para los estudios de viabilidad de estas aplicaciones. Entre ellas, la determinación de la curva entalpía temperatura (h - T) tiene especial relevancia, ya que caracteriza la capacidad de almacenamiento de energía térmica del material. De forma general, la realización de esta medida experimental suele estar dificultada por algunos fenómenos habituales en los PCM, tales como la histéresis, el subenfriamiento o los gradientes térmicos en la muestra que se analiza en calorimetría (Lázaro et al. 2013).

En el ámbito específico de las aplicaciones relacionadas con la construcción, en las que los PCM suelen estar integrados formando materiales compuestos, a la problemática anterior se añade la asociada con la representatividad del tamaño de la muestra. Por ello se acepta ampliamente la utilización del DSC (Differential Scanning Calorimeter), mientras que el uso del método T-history, en el que se emplean tamaños de muestra de un orden de magnitud superior, viene condicionado por el grado de heterogeneidad del material y por su conductividad térmica.

Ante esta dificultad, los investigadores han propuesto recientemente métodos basados en el análisis térmico de muestras de mayor tamaño, acorde con la experimentación aplicada a materiales compuestos de construcción con PCM. Estos métodos, generalmente basados en el análisis térmico de muestras conformadas en una geometría tipo placa, suponen una prometedora línea de trabajo para la determinación de la curva h - T del citado tipo de compuestos. Sin embargo, en la actualidad escasean los métodos normalizados para la caracterización de la capacidad de almacenamiento térmico de estos materiales.

Además, las medidas asociadas a los distintos métodos experimentales aplicados para la determinación de las propiedades suelen estar afectadas por niveles de incertidumbre relevante. Por lo tanto, se considera conveniente utilizar de forma complementaria esta información, asociada a la exactitud de las estimaciones de las propiedades termofísicas en diferentes estudios teóricos acerca del comportamiento térmico de los PCM en las distintas aplicaciones.

Otra de las herramientas fundamentales en el análisis y el diseño de estos sistemas es el desarrollo de modelos para su simulación. Éstos no sólo deben permitir el estudio aislado de la transferencia de calor en los nuevos elementos activos con almacenamiento latente de energía, sino que es necesario que puedan ser integrados en programas de simulación de edificios.

Desde el punto de vista matemático, el tratamiento del proceso del cambio de fase exige modificaciones importantes en los algoritmos clásicos para la evaluación de la transferencia de calor en los cerramientos que utilizan este tipo de programas, habitualmente adaptados y optimizados para la simulación de materiales con propiedades termofísicas constantes.

Por otro lado, la integración de los modelos específicos para el cálculo del comportamiento térmico de elementos con PCM dentro de programas de simulación energética de edificios exige un compromiso entre la complejidad y la precisión del modelo y el esfuerzo computacional que implica. Debido a las características particulares de cada tipo de sistema, el grado de desarrollo de los modelos de elementos de construcción con PCM pasivos y activos ha sido desigual.

Marco de la tesis y antecedentes

El desarrollo de la tesis ha estado ligado al disfrute de la Ayuda para la Formación y Contratación de Personal Investigador (FPI) concedida por la Diputación General de Aragón en el año 2010.

La tesis se enmarca dentro de una de las líneas de investigación del grupo GITSE - Grupo de Ingeniería Térmica y Sistemas Energéticos- (<http://i3a.unizar.es/grupo/gitse-13>) relacionada con el almacenamiento de energía térmica con PCM. Esta línea fue iniciada dentro del grupo por la profesora Belén Zalba en 1998 con la realización de su tesis doctoral titulada *Almacenamiento térmico de energía mediante cambio de fase. Aplicaciones en edificios: caracterización del comportamiento de los materiales e instalación de ensayos para prototipos de intercambio de calor con aire*, defendida en 2002.

La continuación e interés por esta línea de investigación relacionada con el almacenamiento de energía térmica quedan reflejados en la realización de otras cuatro tesis doctorales. En primer lugar, las de Ana Lázaro (defendida en 2009) y Pablo Dolado (defendida en 2011), centradas respectivamente en la caracterización y modelización de sistemas de almacenamiento basados en el intercambio de calor entre PCM y aire. En segundo lugar, la de Mónica Delgado (2013) acerca de la caracterización y análisis de suspensiones y emulsiones con PCM. En tercer lugar, M^a Concepción Peñalosa defenderá próximamente su tesis sobre la búsqueda y análisis de PCM de bajo coste. Asimismo, el grupo cuenta con un laboratorio para la determinación de propiedades termofísicas.

El interés por esta línea de investigación se ha visto refrendado por la concesión consecutiva de cuatro proyectos del Plan Nacional I+D+I. Concretamente, esta tesis se desarrolla en el marco de los siguientes proyectos de convocatoria pública:

- Proyecto del Plan Nacional de I+D+I (2009-2011): Contribución del almacenamiento de energía térmica a la eficiencia energética en edificios y aplicaciones industriales (ENE2008-06687-CO2-02)
- Proyecto del Plan Nacional de I+D+I (2012-2014): Mejora de la eficiencia energética en edificios mediante el almacenamiento de energía térmica (ENE2011-28269-CO3-01)

Además, este trabajo está relacionado con el proyecto de investigación en colaboración con la empresa CIAT Almacenamiento de energía térmica mediante materiales de cambio de fase y su aplicación para la calefacción y refrigeración solar, que fue parcialmente financiado por la Agencia de Innovación y Desarrollo de Andalucía y el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial.

En el ámbito internacional, el grupo de investigación ha participado activamente en los grupos de trabajo de la Agencia Internacional de la Energía: Task-Annex 42-24, Annex 20 y Annex 25, en el proyecto europeo de colaboración Cost Action TU0802 y dos proyectos de colaboración transfronteriza con la Université de Pau et des Pays de l'Adour.

Capítulo 1. Revisión del estado del arte sobre utilización del almacenamiento térmico con PCM en elementos de construcción termoactivos

El estado del arte se centra en los principales aspectos que intervienen en la investigación relacionada con la incorporación de PCM en elementos de construcción activos. En primer lugar, se aborda el análisis de los trabajos de investigación que se ocupan del estudio de estas aplicaciones, así como la búsqueda y revisión de patentes y modelos de utilidad que describan elementos y sistemas de construcción de este tipo.

Seguidamente, se analizan las características de los principales materiales disponibles que permiten la integración de los PCM en los elementos constructivos. Para ello, se ha llevado a cabo una revisión de los trabajos de investigación relacionados con el desarrollo, preparación y análisis de propiedades de distintos materiales de construcción con PCM. Además, se ha realizado una recopilación de los compuestos y sistemas de construcción, actualmente comercializados, que permiten la inclusión del almacenamiento de energía térmica latente en los componentes de los edificios.

El capítulo también se ocupa de los aspectos de la determinación de propiedades y análisis de características de estos nuevos materiales de construcción que, en relación a los compuestos tradicionales, requieren un tratamiento específico, presentan ciertas particularidades o pueden resultar críticos.

Por último, se presenta una revisión de los modelos teóricos utilizados para el cálculo de la transferencia de calor en los elementos de construcción termoactivos con PCM. Esta sección se completa con una recopilación de los modelos disponibles dentro de programas de simulación energética de edificios.

1.1. Trabajos de investigación relacionados con el uso de PCM en elementos termoactivos

En este apartado se describen y analizan los trabajos de investigación publicados hasta el momento que se ocupan del estudio de la aplicación del almacenamiento térmico latente en componentes termoactivos. Estos elementos se han clasificado según el tipo de activación térmica, ya sea mediante resistencias eléctricas o a través de la circulación de agua. Ambos tipos de activación presentan similitudes, especialmente durante el proceso de liberación de la energía térmica latente almacenada. Sin embargo, difieren en el tipo de aplicaciones y usos de almacenamiento de la energía y en la transferencia de calor durante el proceso de carga del PCM.

Originalmente, el interés en estos sistemas estuvo motivado por su aplicación en el desplazamiento de la demanda de calefacción a las horas nocturnas en suelos radiantes eléctricos. En las publicaciones más recientes, por el contrario, predominan los estudios de elementos activados para calefacción y refrigeración mediante la circulación de agua. Estos componentes no sólo permiten un uso más eficiente de la energía, sino que facilitan la

integración de la energía solar o de fuentes de baja exergía, tales como la refrigeración gratuita con torres de refrigeración.

1.1.1. Sistemas de suelo radiante eléctrico

Barrio et al. (1993) realizaron una comparativa entre el uso del almacenamiento de energía térmica sensible y latente en un sistema de suelo radiante eléctrico. Con este propósito, estudiaron en una instalación experimental de laboratorio la oscilación de la temperatura, medida durante algunos ciclos diarios completos de carga y descarga, de sendos sistemas que incorporaban, respectivamente, arena y neopentaglicol como material de almacenamiento. La utilización de este PCM de transición sólido-sólido permitió su integración en el sistema en forma de gránulos. Los resultados de la experimentación mostraron la notable reducción de la fluctuación térmica a lo largo del ciclo completo producida gracias a la energía absorbida y liberada durante el proceso de cambio de fase.

Amir et al. (1998) llevaron a cabo un estudio numérico comparativo sobre la aplicación del almacenamiento térmico -mediante dos tipos de cápsulas que contenían agua y octadecano- a un sistema de suelo radiante eléctrico. Los modelos que utilizaron habían sido previamente validados mediante su contraste con datos experimentales obtenidos en una instalación de laboratorio. A partir de estos resultados numéricos, mostraron la capacidad del PCM para reducir la oscilación térmica diaria de la superficie del elemento. Unas conclusiones similares extrajeron Farid y Chen (1999) de su estudio centrado en la simulación del comportamiento de un sistema de este tipo. En ambas publicaciones se ha analizado la respuesta suelo radiante eléctrico a lo largo de un ciclo diario de carga y descarga de manera independiente con respecto al resto del edificio. En ellos, la adopción de condiciones de contorno simplificadas, tales como la asunción de una temperatura del ambiente interior constante, excluye la consideración de efectos relevantes como la interacción entre el elemento de calefacción y los demás de componentes de la edificación.

Posteriormente, Lin et al. (2004) y Lin et al. (2005) presentaron sendos trabajos, numérico y experimental respectivamente, sobre un sistema de suelo radiante eléctrico flotante con PCM embebido en una matriz polimérica². En estos estudios, se analiza el comportamiento del elemento instalado en un cubículo experimental monitorizado. Los resultados del análisis teórico mostraron la capacidad del sistema para trasladar el consumo total de energía de calefacción al periodo de menor demanda eléctrica. Sin embargo, la observación experimental evidenció cómo la temperatura del aire interior sobrepasaba notablemente los límites de confort en días con una demanda de calefacción baja. Los autores atribuyeron esta característica negativa del funcionamiento a la reducida demanda de térmica durante los días de experimentación y a la elevada temperatura de cambio de fase del PCM (52°C). En este sistema concreto, la selección de esta temperatura de almacenamiento, realizada a partir de un modelo numérico (Lin et al. 2004), estuvo condicionada por la resistencia térmica asociada al espacio de aire situado entre la capa de PCM y la superficie de revestimiento del suelo. El sistema de colocación empleado, similar

² En adelante SSPCM, del inglés *Shape Stabilized Phase Change Material*.

al de un suelo técnico (fig. 1.1), pudo ser perjudicial para el comportamiento del suelo radiante.

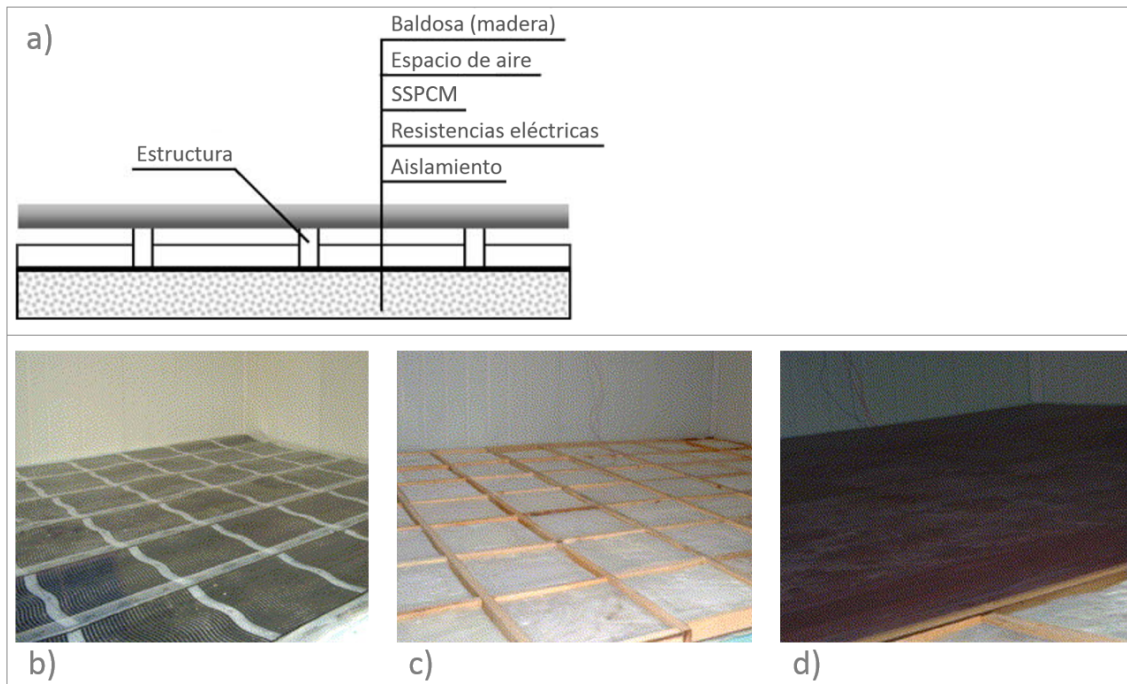


Fig. 1. 1. Sistema de suelo radiante eléctrico con placas de SSPCM propuesto por Lin et al. (2005): a) representación esquemática; b) imagen de la colocación de las resistencias eléctricas; c) disposición de las placas de PCM; d) instalación del recubrimiento superficial.

En su siguiente trabajo (Lin et al. 2007), los investigadores propusieron la instalación de un sistema de ventiladores en el suelo radiante original (Lin et al. 2005). Esta modificación, que permite un mayor control de la liberación de la energía térmica almacenada, estaba orientada a su aplicación en edificios de oficinas, cuya demanda de calefacción se concentra durante un periodo concreto del día. Los autores identificaron la capacidad de almacenamiento latente y la temperatura de cambio de fase como los principales parámetros del diseño, que debían ser seleccionadas en función de la demanda térmica.

Más recientemente, Cheng et al. 2015 presentaron un trabajo sobre el análisis numérico de la influencia de la conductividad térmica en un sistema de suelo radiante eléctrico con placas de SSPCM y el estudio experimental de su funcionamiento al ser instalado en una habitación monitorizada de un edificio real. Según sus resultados empíricos, el sistema fue capaz de trasladar el consumo de la energía eléctrica empleado en calefacción al periodo de baja demanda, si bien la temperatura del aire interior medida alcanzaba un límite inferior excesivamente bajo (16°C), considerando los criterios de confort habitualmente utilizados.

Por otro lado, Barzin et al. (2015) realizaron un estudio experimental de un sistema de suelo radiante eléctrico de instalación en seco, montado sobre un cubículo experimental, en el que el PCM se integraba en la placa de yeso colocada sobre las resistencias eléctricas.

La energía empleada en calefacción se gestionaba según el precio horario de la energía eléctrica, mediante un sencillo control con histéresis con una temperatura de consigna diferente para los dos tramos en los que se divide dicho coste. En comparación con la celda experimental de referencia, que utilizaba un sistema de calefacción por aire, el elemento propuesto permitía un ahorro del 18% en el coste de la energía. Este ahorro se asocia al traslado de la energía consumida durante el primer tramo matutino de demanda punta. Por el contrario, los autores reconocieron que el efecto del PCM durante las últimas horas del día es irrelevante al encontrarse en ese momento plenamente descargado. Adicionalmente, los autores propusieron la instalación de las placas de Energain (Dupont) para obtener el beneficio asociado al almacenamiento -pasivo- de la radiación solar y a la prevención del sobrecalentamiento durante las horas centrales del día. A partir de los resultados experimentales, cuantificaron el ahorro energético producido por el funcionamiento combinado de ambos componentes -suelo radiante y placas de pared con PCM- en un 28%.

1.1.2. Sistemas de calefacción y refrigeración integrados en superficies interiores, activados mediante la circulación de un fluido caloportador

1.1.2.1. Sistemas de calefacción o refrigeración integrados en el suelo

Un temprano ejemplo en el que se analiza el potencial del almacenamiento latente en sistemas de suelo radiante para la integración de la energía solar se encuentra en el trabajo de Salt (1985). En él, se propone un elemento radiante, instalado sobre un lecho de rocas o cápsulas con PCM, que almacena la energía solar a través del intercambio con el aire que previamente circula por los colectores. Esta energía almacenada se difunde por conducción a través de la losa del suelo. Salt propuso el estudio teórico de la evolución de la temperatura del edificio, mediante un modelo analítico simplificado, una vez que cesa el aporte de energía solar. Este estudio preliminar mostró la capacidad del PCM para reducir considerable el tamaño del lecho.

Más adelante, Yamaguchi y Sayama (1997) realizaron un trabajo experimental sobre el análisis de una instalación en la que se acoplaba una bomba de calor que intercambiaba calor con el terreno a un sistema de suelo radiante con almacenamiento térmico con PCM inorgánico ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), macroencapsulado, montado en un cubículo experimental. En este caso, el almacenamiento térmico se utilizaba para desplazar el consumo de energía eléctrica a las horas valle de demanda. Los autores mostraron el comportamiento del sistema durante un periodo completo de carga y descarga. Después de cesar el suministro de energía térmica, durante el proceso de solidificación, que duraba alrededor de nueve horas, la temperatura del cubículo se mantenía estable.

En la década siguiente, Farid y Kong (2001) ensayaron, mediante un prototipo a escala de laboratorio, un sistema de suelo radiante con PCM contenido en cápsulas esféricas (Cristopia) incluidas dentro de la losa de hormigón. En los ensayos realizados de carga y descarga, correspondientes a un ciclo diario de desplazamiento del consumo a las horas valle de la tarifa eléctrica, el suelo radiante con PCM, en relación con un sistema convencional, reducía de manera apreciable la oscilación de la temperatura del elemento.

En el trabajos de Zeng et al. (2009) y (2010) se realizó un estudio numérico y experimental del funcionamiento de un sistema de suelo radiante, instalado dentro de un cubículo experimental, alimentado por una fuente de energía cuyo suministro se asemejaba al de unos colectores solares. Gracias al almacenamiento térmico, el 50% de la energía solar almacenada se liberaba como potencia de calefacción durante el periodo sin suministro de energía. En relación al sistema de suelo radiante que se tomó con referencia, se reducía en un 50% la oscilación de la temperatura del aire interior del cubículo, de tal manera que se mantenía dentro de unos niveles de confort aceptables.

Por su parte, Ansuini et al. (2011) describieron el desarrollo y optimización de un sistema de suelo radiante de instalación en seco en el que los conductos de agua se alojan en un lecho de PCM granulado (Rubitherm GR27) (fig. 1.2a y b). Debido a la baja conductividad equivalente del lecho, los investigadores estimaron necesaria la instalación de una estructura metálica, similar a la utilizada por Eurotherm para sistemas compactos de suelo radiante (fig. 1.2c), que mejorara la conductividad efectiva del elemento. A través de los ensayos llevados a cabo sobre el componente a escala de laboratorio obtuvieron un modelo numérico calibrado. Éste fue integrado dentro de otra herramienta de cálculo que permitía la simulación energética de habitaciones de edificios. Los resultados numéricos finales mostraron el potencial del sistema para reducir el consumo de energía de refrigeración alrededor de un 25% en edificios de construcción ligera gracias a la mitigación, asociada a la inercia térmica adicional que proporciona el PCM, del sobrecalentamiento del ambiente interior. Por el contrario, durante el periodo invernal, el modelo numérico no estimaba una reducción apreciable del consumo de energía en calefacción.

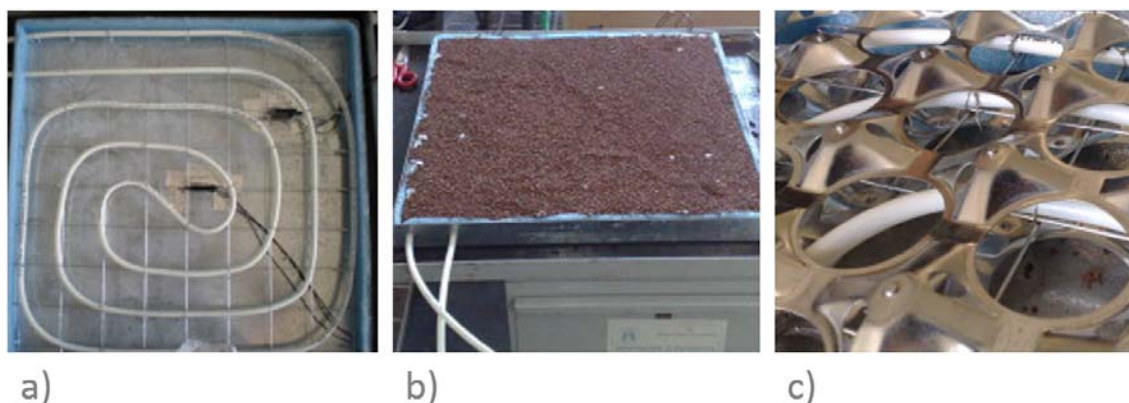


Fig. 1. 2. a y b. Prototipo de suelo radiante desarrollado por Ansuini et al. (2011) para su ensayo a escala de laboratorio. c) Estructura metálica de acero galvanizado instalada en el elemento (Eurotherm, Ansuini et al. 2011).

Jin y Zhang (2011) realizaron un estudio numérico de un suelo radiante y refrescante con dos PCM destinados al traslado del consumo de energía a las horas valle de producción eléctrica. Mediante el análisis de la respuesta dinámica del elemento aislado, bajo condiciones de contorno simplificadas, realizaron una optimización del sistema, en términos de temperatura de cambio de fase y capacidad de almacenamiento de energía.

Según sus estimaciones, el 40% de la energía almacena podía liberarse durante el periodo de mayor demanda eléctrica.

Cabrol y Rowley (2012) realizaron un estudio numérico sobre el comportamiento de distintos sistemas de suelo radiante acoplados a bombas de calor de intercambio con aire. Analizaron la capacidad del almacenamiento térmico para desplazar el consumo eléctrico al periodo nocturno. En este caso, el almacenamiento latente permitía aumentar los niveles de confort al mantener más estable la temperatura interior.

Por otro lado, en el trabajo de Huang et al. (2014), sobre el estudio numérico y experimental de un suelo radiante acoplado a colectores solares, se comparó el funcionamiento de dos sistemas, con y sin PCM, instalados en sendas habitaciones monitorizadas. La configuración propuesta resultó novedosa ya que se utilizaban dos mallas de tubos denominados capilares³, situadas arriba y debajo de la capa que contiene el PCM macroencapsulado (fig. 1.3). En este caso, aunque el PCM era capaz de trasladar un 50% de la energía térmica absorbida durante las horas sin aporte solar, la temperatura del aire interior no alcanzaba unos niveles aceptables de confort. Este hecho puede atribuirse a la elevada resistencia térmica equivalente entre el material de almacenamiento y el espacio interior.

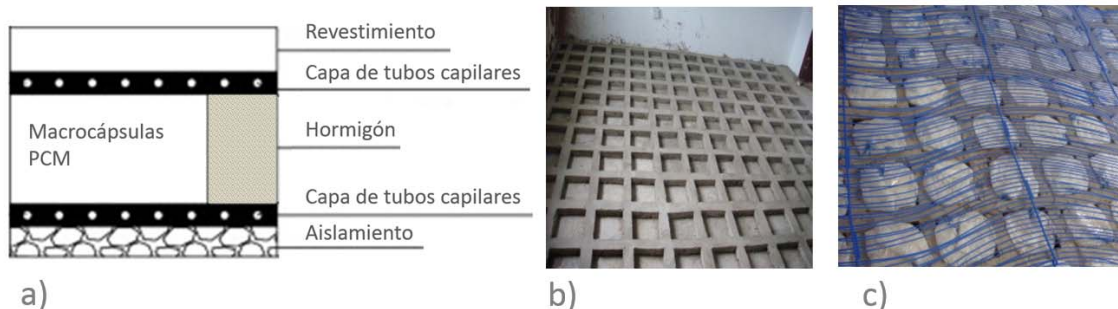


Fig. 1.3. Sistema de suelo radiante propuesto y estudiado por Huang et al. (2014). a) Representación esquemática en sección; b) imagen de la estructura de hormigón donde se aloja el PCM macroencapsulado; c) imagen de la malla de tubos capilares superior instalada.

En la reciente publicación de Zhou y He (2015), se ha estudiado experimentalmente la respuesta de distintos sistemas de suelo radiante, con PCM o almacenamiento sensible, activados por tubos polietileno reticulado convencionales o por una malla de tubos denominados capilares. Esta última configuración, que acerca el proceso de transferencia de calor en el elemento a la conducción unidimensional, por un lado aumenta, en relación con el sistema tradicional, la potencia de calefacción o refrigeración y, por otro lado, reduce el tiempo su tiempo de respuesta.

³ Pese a que en estos conductos el flujo de agua no está impulsado mediante el fenómeno de capilaridad, los autores utilizan esta expresión aceptada dentro de este ámbito de trabajo. De hecho, la norma EN 15377-1 (2009) emplea esta misma denominación para los sistemas clasificados como tipo F. Así pues, en este documento se mantendrá el uso de la mencionada expresión.

1.1.2.2. Sistemas de refrigeración o calefacción integrados en el techo

Koschenz y Lehman (2004) llevaron a cabo un interesante trabajo en el desarrollo de un panel modular de techo refrescante con PCM (fig. 1.4). Este sistema fue presentado como una alternativa a los elementos termoactivos (TABS) para obras de rehabilitación. A partir de un estudio numérico previo, obtuvieron los principales parámetros de diseño: temperatura de cambio de fase, conductividad térmica efectiva del componente y la capacidad de almacenamiento incluida. El elemento se dimensionó para ser capaz de hacer frente, una vez que cesa el suministro de agua de refrigeración, a una carga de 40W/m^2 durante ocho horas sin producir un aumento de la temperatura del aire interior por encima de un cierto nivel de confort. Bajo esta premisa se realizó el ensayo de laboratorio de un prototipo (fig. 1.4d). Este estudio reveló la necesidad de incluir un conjunto de aletas que mejorara la conductividad térmica efectiva de la placa de yeso y PCM del componente (fig. 1.4c).

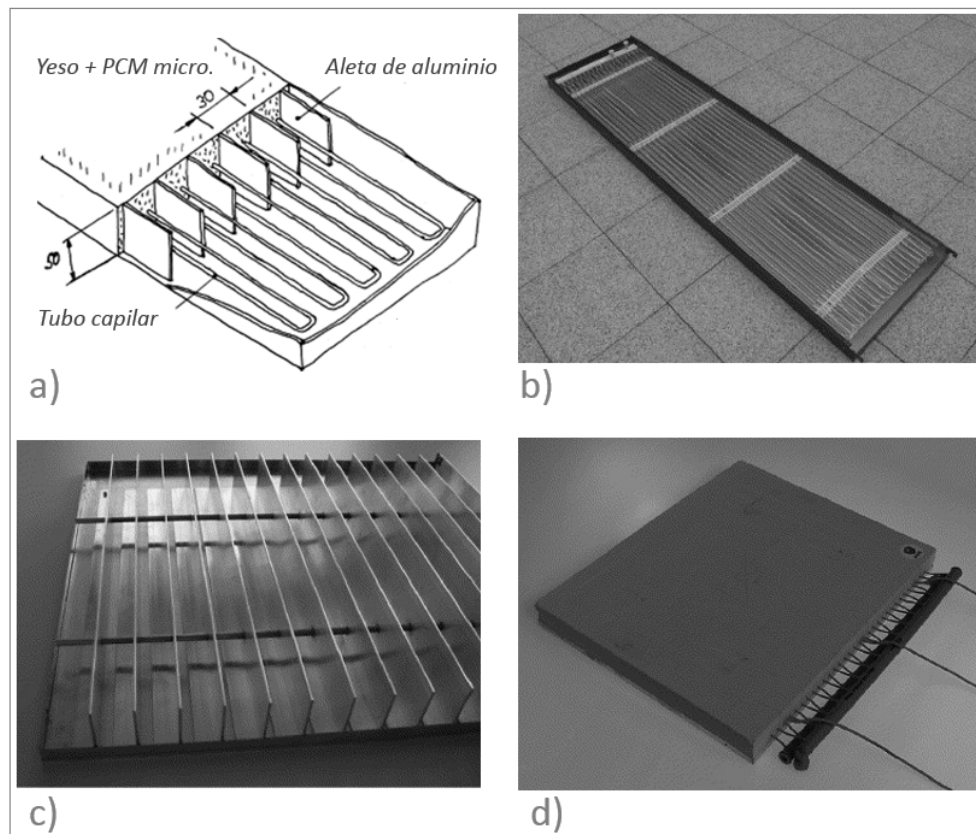


Fig. 1. 4. Panel de techo refrescante modular desarrollado y analizado por Koschenz y Lehmann (2004). a) Croquis que representa el diseño; b) configuración del módulo antes de verter la masa de yeso con PCM microencapsulado; c) sistema de aletas de aluminio; d) prototipo desarrollado para el ensayo de laboratorio.

Más adelante, se llevó a cabo el proyecto de investigación “PCM-Aktiv” (Hausmann y Schossig 2006), que coordinó el instituto Fraunhofer de instalaciones energéticas solares (Fraunhofer ISE). El objetivo principal del mismo fue el desarrollo de sistemas de construcción termoactivos para su aplicación en refrigeración. El proyecto contaba con la

participación de la empresa BASF, de modo que los materiales y sistemas que se utilizaron fueron desarrollados a partir de la incorporación de PCM microencapsulado en materiales de construcción. Dentro de este entorno, en los trabajos de Kalz et al. (2006) y Kalz et al. (2007) se realizó un estudio numérico del comportamiento de un sistema de techo refrescante con PCM que se acopla a distintas fuentes de energía y modos de operación. En concreto, la principal ventaja que obtuvieron de la incorporación del almacenamiento de energía térmica latente fue la reducción del sobrecalentamiento durante las horas centrales del día cuando el sistema se acoplaba a una torre de refrigeración que opera durante la noche. Señalaron, además, que si se compara con los elementos termoactivos tradicionales, la adición de PCM es más aconsejable en edificios de construcción ligera (Kalz et al. 2006).

Posteriormente, en el trabajo de Haussmann et al. (2009) se presentaron los resultados experimentales, obtenidos en el marco del mismo proyecto, de tres sistemas de techo refrescante instalados en edificios reales. En ellos, se utilizaron conductos capilares para activar la masa del material compuesto de construcción (yeso o mortero) que contenía el PCM microencapsulado. En la figura 1.5 se muestran dos imágenes del sistema instalado en el instituto Fraunhofer ISE. En dos de estas instalaciones demostrativas, el propósito del almacenamiento térmico era el traslado del consumo de energía al periodo nocturno. Los datos experimentales que presentaron muestran cómo los sistemas eran capaces de mantener la temperatura del ambiente interior dentro del rango de confort cuando el sistema operaba únicamente por la noche. Sin embargo, en este trabajo no se establece una comparación con una instalación de referencia sin PCM, de modo que no es posible identificar las mejoras asociadas a la capacidad adicional de almacenamiento térmico. Por otra parte, en el tercer ejemplo presentado, acoplaron unos paneles de techo refrescante a un sistema de intercambio con el terreno. Debido a que durante la operación real del edificio se registraron temperaturas en el terreno superiores a las utilizadas para el diseño, fue necesaria la instalación de una bomba de calor para poder satisfacer la demanda de refrigeración. Los autores admitieron que el éxito en la experimentación de estos sistemas es muy sensible a los posibles fallos en la etapa de diseño.

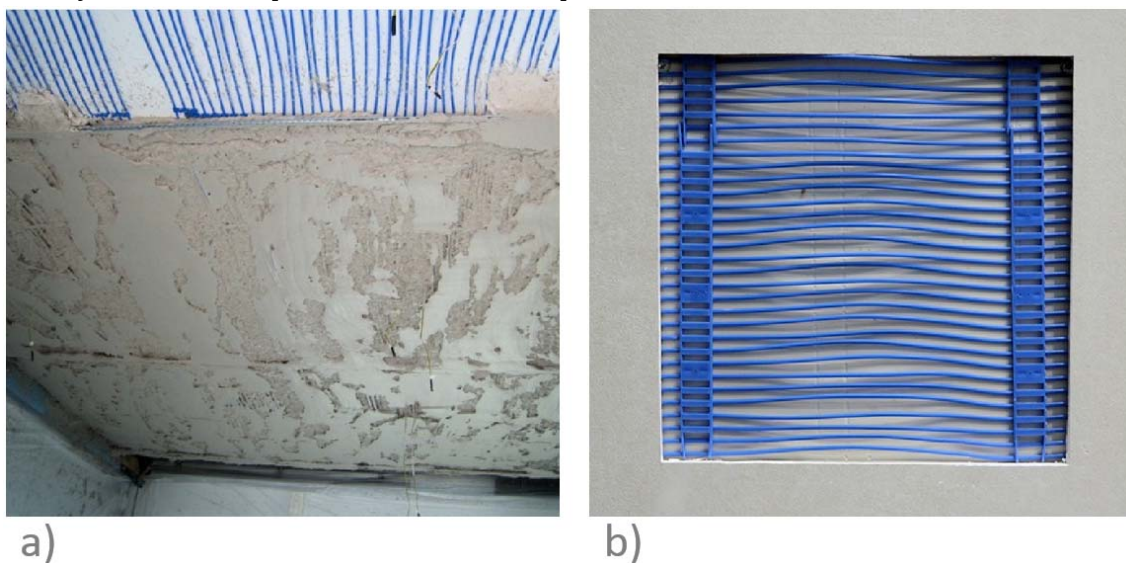


Fig. 1.5. Sistema de techo refrescante de conformación *in situ* instalado en el Fraunhofer ISE. a) Imagen del sistema durante el proceso de instalacion; b) imagen de la disposición de los tubos capilares (fuente: <http://www.enob.info/>).

En la siguiente década, Tzivanidis et al. (2012) analizaron numéricamente el comportamiento de un techo refrescante con PCM para su aplicación en el desplazamiento de la energía eléctrica consumida por la bomba de calor al periodo nocturno. En este caso, se obtenía la ventaja adicional de hacer funcionar a la enfriadora bajo condiciones más favorables. Además, la estabilización de la temperatura del elemento durante el proceso de solidificación dificultaba la condensación de agua sobre su superficie.

Son interesantes también los trabajos más recientes de Klinker et al. (2014) y Konstantinidou et al. (2014) sobre el estudio experimental de dos configuraciones de panel modular de techo refrescante en el que el PCM SP22 –mezcla de parafina y sal hidratada- de Rubitherm se integra en las cápsulas de aluminio en forma de placa, denominadas CSM (*Compact Storage Modules*), del mismo fabricante. En el primero de ellos, Klinker et al. (2014), se estudia la respuesta del elemento durante los procesos de carga y descarga bajo condiciones de contorno controladas y constantes en el tiempo en la instalación a escala de laboratorio que se describe con mayor detalle en Klinker et al. (2014b). A su vez, en el trabajo de Konstantinidou et al. (2014) se ensayan ambos sistemas en dos habitaciones monitorizadas. Los resultados de ambos trabajos reflejan la influencia de la posición del PCM en la respuesta dinámica del elemento: durante el proceso de carga, la colocación del PCM sobre los tubos facilita la absorción de energía del ambiente interior, mientras que en el transcurso de la descarga, la potencia de refrigeración suministrada es en ambos casos similar.

1.1.3. Análisis de los trabajos de investigación revisados

En la tabla 1.1 se resumen los principales aspectos de los trabajos relacionados con la aplicación de los PCM en elementos termoactivos. Desde el punto de vista de la metodología, éstos se han centrado, por un lado, en el estudio numérico de la transferencia de calor en estos elementos, bien como componentes independientes o bien de forma integrada con el resto del edificio, con la finalidad de analizar su comportamiento térmico (p. ej. Kalz et al. 2006, Tzivanidis et al. 2012) o de dimensionar estos sistemas (p. ej. Lin et al. 2004). Por otro lado, dentro del trabajo experimental, el comportamiento de estos sistemas se ha estudiado a dos escalas. En primer lugar, los estudios de prototipos a escala de laboratorio bajo condiciones de operación controladas permiten, además de caracterizar la emisión térmica del elemento (de una forma análoga al método expuesto en la norma EN 1264-2), la evaluación de su respuesta dinámica (Koschenz y Lehmann 2004, Ansuini et al. 2011, Klinker et al. 2014). Este análisis térmico del componente resulta muy interesante en la etapa de diseño previa a la planificación de ensayos a mayor escala, especialmente en sistemas prefabricados más complejos (p. ej. los módulos de techo refrescante propuestos por Koschenz y Lehmann 2004 o por Klinker et al. 2014). Por otro lado, los trabajos de investigación experimentales se han ocupado del ensayo de estos elementos instalados espacios interiores tales como cubículos experimentales (p.ej. Lin et al. 2004) o habitaciones monitorizadas que operan bajo condiciones simplificadas (p. ej. sin ocupación ni ventilación: Konstantinidou et al. 2014), con el principal objetivo de demostrar su viabilidad técnica. Sólo en el trabajo de Haussmann et al. (2009) se muestra el funcionamiento, durante

unos pocos días, de dos sistemas de techo refrescante instalados en edificios de oficinas. En la mayor parte de los casos, el éxito en los resultados de estas avanzadas etapas del desarrollo de los sistemas ha estado muy condicionado por el trabajo previo dedicado, entre otros aspectos, a la selección de materiales, por un lado, y, por otro lado, al análisis, diseño térmico y dimensionamiento del elemento activo.

Uso del TES	Aplicación	Trabajos de investigación	Metodología	Tipo de sistema	Integración del PCM / PCM	Parámetros TES	Características generales
Nivelación de la demanda	Suelo radiante eléctrico	Barrio et al. (1993)	Experimental (prototipo escala de laboratorio)	Suelo radiante de instalación en seco	PCM transición sólido-sólido / Neopentaglicol	2400kJ/m ² T _m = 34-39°C	-El almacenamiento de energía térmica permite trasladar prácticamente el total de electricidad a las horas valle -La fluctuación diaria de temperaturas se reduce notablemente en relación a un sistema tradicional (sólo sensible) -El PCM mitiga el sobrecalentamiento del aire interior en verano -Una temperatura de cambio de fase excesivamente alta puede causar en los días de baja demanda de calefacción el sobrecalentamiento del aire interior (Lin et al. 2005) -la resistencia térmica elevada entre el material y el ambiente interior puede condicionar la capacidad del sistema para mantener la temperatura dentro de los niveles de confort
		Amir et al. (1998)	Experimental (prototipo escala de laboratorio). Modelo numérico (elemento aislado)	Suelo radiante tradicional (conformación <i>in situ</i>)	Macrocapsulas (placas) / Octadecano	2880kJ/m ² ; T _m =28°C	
		Farid et al. (1999)	Modelo numérico (elemento aislado)	Suelo radiante de instalación en seco	Macrocapsulas (placas) / Parafina	2000kJ/m ² ; T _m =40°C	
		Lin et al. (2004) y (2005)	Modelo numérico (integrado en el edificio). Experimental (cubículo)	Suelo radiante de instalación en seco	PCM en estructura sólida (SSPCM)	1900kJ/m ² ; T _m =52°C	
		Lin et al. (2007)	Modelo numérico (integrado en el edificio). Experimental (cubículo)	Suelo radiante de instalación en seco. Híbrido: radiante y circulación de aire	PCM en estructura sólida (SSPCM)	1900kJ/m ² ; T _m =40-50°C	
		Cheng et al. (2015)	Modelo numérico (elemento aislado). Experimental (habitación monitorizada)	Suelo radiante de instalación en seco	PCM en estructura sólida (SSPCM)	1600kJ/m ² ; T _m =29°C	
		Barzin et al. (2015)	Experimental (cubículo)	Suelo radiante de instalación en seco	PCM impregnado en yeso	T _m =28°C	
	Suelo radiante / refrescante	Yamaguchi y Sayama (1997)	Experimental (cubículo)	Suelo radiante de instalación en seco	Macrocapsulas (placas) / Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	1400kJ/m ² ; T _m =30-32°C	
		Farid et al. (2001)	Experimental (prototipo escala de laboratorio). Modelo numérico (elemento aislado)	Suelo radiante tradicional (conformación <i>in situ</i>)	Macrocapsulas (nódulos Cristopia) / Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	900kJ/m ² ; T _m =28°C	

		Jin y Zhang (2011)	Estudio numérico (elemento aislado)	Suelo radiante / refrescante instalación en seco. 2 PCMs	Macrocapsulas (placas)	1250kJ/m ² ; T _m =18 y 38°C	
		Cabrol y Rowley (2012)	Estudio numérico (modelo integrado en el edificio)	Suelo radiante tradicional (conformación <i>in situ</i>)	Compuesto hormigón-PCM (sin definir)	≈3600kJ/m ² ; T _m =24 ó 26°C	
	Techo refrescante	Koschenz and Lehmann (2004)	Estudio numérico (modelo integrado en el edificio). Experimental (prototipo escala de laboratorio)	Panel modular de techo	Yeso y PCM microencapsulado	1152 kJ/m ² ; T _m =21°C	
		Hausmann et al. (2009)	Experimental (monitorización de dos sistemas de techo refrescante en distintos edificios reales)	Techo conformado <i>in situ</i> (tubos capilares)	-Yeso y PCM microencapsulado -Mortero y PCM microencapsulado	580kJ/m ²	
		Tzivanidis et al. (2012)	Estudio numérico (modelo integrado en el edificio)	No se detalla	Macrocapsulas	15000kJ/m ² , T _m =20-24°C	
		Klinker et al. (2014)	Experimental (prototipo escala de laboratorio)	Panel modular de techo (2 configuraciones)	Macrocapsulas (placas CSM Rubitherm) / SP22 (Rubitherm)	T _m =22°C	
		Konstantinidou et al. (2014)	Experimental (habitación monitorizada)	Panel modular de techo	Macrocapsulas (placas CSM, Rubitherm) / SP22 (Rubitherm)	T _m =22°C	
Integración de energía solar	Suelo radiante	Salt et al. (1985)	Estudio numérico preliminar mediante un modelo numérico simplificado	Lecho de PCM macroencapsulado bajo el suelo radiante	Macrocapsulas / Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	3400kJ/m ² ; T _m =28°C	-El PCM permite la liberación del 50% de la energía solar almacenada durante la noche
		Zeng et al. (2009) y (2010)	Modelo numérico (integrado en el edificio).	Suelo radiante de instalación en seco	PCM en estructura sólida (SSPCM)	1800kJ/m ² ; T _m =32-34°C	

			Experimental (cubículo)				
		Zhou et al. (2015)	Modelo numérico (integrado en el edificio) Experimental (cubículo)	Suelo radiante de instalación en seco	Macrocápsulas	2400kJ/m ² ; T _m =29°C	
		Huang et al. (2015)	Experimental (habitación monitorizada). Modelo numérico (elemento aislado)	Conformación <i>in situ</i> . Doble capa de tubo capilar	Macrocápsulas / Ácidos grasos saturados	3400kJ/m ² ; T _m =29°C	
Torres de refrigeración	Techo refrescante	Kalz et al. (2006) Kalz et al. (2007)	Estudio numérico: operación nocturna	Sistema de techo con tubos capilares	Yeso y PCM microencapsulado	T _m =19-22°C	-Con respecto al sistema convencional, el PCM reduce el sobrecalentamiento durante las horas sin suministro de agua de refrigeración -La incorporación de PCM es más aconsejable en edificios de construcción ligera.
Intercambio con el terreno	Techo refrescante	Hausmann et al. (2009)	Experimental (monitorización de un sistemas de techo refrescante en un edificio real)	Panel modular de techo	Yeso y PCM microencapsulado	T _m =23-25°C	-En la etapa de diseño, el cálculo del intercambio de calor con el terreno es crítica.
Control de la temperatura interior	Suelo radiante	Ansuini et al. (2011)	Experimental (prototipo escala de laboratorio). Numérico (modelo calibrado integrado en el edificio)	Suelo radiante compacto de instalación en seco	GR27 (Rubitherm)	2400kJ/m ² ; T _m =27°C	-El PCM puede mitigar el efecto del sobrecalentamiento en verano y de esta manera lograr ahorros en el consumo energético de refrigeración de hasta el 25% -El consumo de calefacción no se ve afectado por la integración de PCM en el suelo radiante

Tabla 1. 1. Resumen de los principales aspectos de las publicaciones sobre la aplicación de los PCM en elementos termoactivos.

1.1.3.1. Materiales utilizados

Predomina en los trabajos experimentales analizados, especialmente los más recientes, el uso de PCM orgánico. Los materiales inorgánicos, pese a presentar la ventaja de no ser inflamables, ofrecen ciertas dificultades –específicas en esta aplicación– relacionadas con el fenómeno del subenfriamiento. En su aplicación para techo refrescante, este fenómeno obliga a rebajar la temperatura del agua de suministro (Klinker et al. 2014), lo cual puede acarrear problemas de condensación sobre la superficie del elemento. A su vez, en el funcionamiento en calefacción, cuando cesa el aporte de energía térmica, la temperatura del ambiente interior puede caer por debajo de niveles aceptables hasta que no se inicie la cristalización.

La integración del PCM se plantea habitualmente en forma de macrocápsulas o mediante su incorporación a polímeros (SSPCM). No obstante, existen algunos ejemplos en los que se utilizan compuestos con materiales habituales de construcción como el yeso (Koschenz y Lehmann 2004, Haussmann et al. 2009, Barzin et al. 2015) o materiales minerales porosos con PCM impregnado (Ansuini et al. 2011). En la sección 1.3, se amplía esta información con una revisión de los principales materiales, investigados y comercializados, que permiten la incorporación de los PCM a los elementos constructivos.

1.1.3.2. Aplicación del almacenamiento de energía térmica

En los trabajos de investigación publicados hasta el momento, se ha estudiado principalmente el uso de los elementos termoactivos con PCM en dos aplicaciones: por un lado, el aprovechamiento de la capacidad de almacenamiento de energía para la utilización de estrategias de desplazamiento al periodo nocturno de la demanda eléctrica empleada en climatización y, por otro lado, la integración de energía solar para calefacción. Otros investigadores, contemplan la posibilidad de integrar estos componentes con fuentes de baja exergía, tales como el intercambio con el terreno (Koschenz y Lehmann 2004, Haussmann et al. 2009) y el uso de torres de refrigeración (Kalz et al. 2006, Haussman et al. 2009). Por último, Ansuini et al. (2014) proponen la utilización del almacenamiento latente en un sistema de suelo radiante con el objetivo de reducir el sobrecalentamiento del aire interior.

De un modo general, los estudios coinciden en que el almacenamiento de energía con PCM permite la absorción y liberación, con una oscilación térmica reducida, de una parte importante de la energía diaria necesaria para la calefacción y refrigeración del espacio interior. En el caso su operación bajo la estrategia de desplazamiento de la demanda, los estudios de Lin et al. (2004) y (2005), Cabrol y Rowley (2012) y Tzivanidis et al. (2012) muestran experimentalmente o predicen mediante modelos numéricos que prácticamente el total del consumo de energía en calefacción o refrigeración se puede concentrar durante el periodo nocturno. Asimismo, en las aplicaciones que integran energía solar, aproximadamente el 50% de la energía térmica diaria almacenada se transmite al ambiente interior a partir del cese de este aporte energético (Zeng et al. 2009, Huang et al. 2014).

No obstante, si se observa la evolución de la temperatura del espacio interior durante este ciclo completo de absorción y liberación de la energía, no todos los resultados presentados hasta el momento son positivos. Se obtiene una predicción de esta oscilación térmica aceptable en los resultados numéricos de Lin et al. (2004), Zeng et al. (2009) y Tzivanidis et al. (2012) y en los experimentales de Zeng et al. (2009). Asimismo, los trabajos teóricos de Haussmann et al. (2009), Ansuini et al. (2012) y Tzivanidis et al. (2012) destacan como una de las principales ventajas de estos elementos, su capacidad para mejorar las condiciones de confort debido a la reducción de esta fluctuación de temperaturas. En cambio, en las observaciones empíricas de Lin et al. (2005), Huang et al. (2014) y Cheng et al. (2015) el control de la temperatura del ambiente interior a través del funcionamiento de los distintos sistemas de suelo radiante no se puede considerar satisfactorio. En el primer caso, la elevada temperatura de cambio de fase provocaba el sobrecalentamiento de la zona, mientras que en los siguientes se alcanzaban temperaturas mínimas excesivamente bajas. La realización del diseño y dimensionamiento de estos componentes, por una parte, a partir de un estudio exhaustivo de la transferencia de calor entre ellos y, por otra parte, de su comportamiento térmico cuando son integrados en el edificio, pueden resultar clave para la obtención de un funcionamiento adecuado.

Si se observan los principales datos relativos al sistema de almacenamiento térmico latente integrado en estos componentes, se observa una considerable dispersión en la temperatura de cambio de fase seleccionada, especialmente en aplicaciones de calefacción, en las oscila entre 26 y 52°C. El valor óptimo de esta característica del material depende, de la posición relativa del PCM en el sistema (Jin y Zhang, 2011) y de la demanda de calefacción o refrigeración (Lin et al. 2004, Cabrol y Rowley 2012). Se ha observado que la metodología llevaba a cabo para el dimensionamiento del almacenamiento térmico latente en estos sistemas varía según los trabajos. Mientras que en algunos experimentales no se especifica el método de cálculo aplicado para el diseño de la instalación (Huang et al. 2014, Barzin et al. 2015), en otros se realizan con este propósito estudios numéricos previos. Estos análisis teóricos están centrados en el estudio de la transferencia de calor transitoria en componente activo, bien de forma aislada (Cheng et al. 2015) –es decir, sujeto a condiciones de contorno que simplifican la dinámica del resto de componentes de la construcción-, o bien de manera integrada en el edificio (Koschenz y Lehmann 2004, Lin et al. 2005, Zeng et al. 2010). La realidad observada en los ensayos presentados hasta el momento (p. ej. Zeng et al. 2009, Huang et al. 2014 y Chen et al. 2015) evidencia cómo durante la operación diaria de estos sistemas se produce una cierta oscilación de la temperatura del ambiente interior, que, si bien se procura esté comprendida dentro de unos niveles de confort aceptables, dista mucho de las condiciones de contorno simplificadas que se aplican en los estudios de la transferencia de calor en estos componentes de forma independiente. El estudio de la interacción de estos elementos activos con el resto del edificio es un aspecto importante durante la fase de diseño y en el estudio de su viabilidad técnica. En línea con esta afirmación, la norma EN 15377-3 (2008), dedicada a proporcionar métodos de cálculo de elementos de construcción termoactivos (con almacenamiento sensible) con el objetivo de aprovechar su masa térmica, señala la necesidad de realizar el cálculo dinámico conjunto del sistema y del resto de componentes del edificio.

1.1.3.3. Transferencia de calor en los elementos termoactivos

La transferencia de calor dentro de estos sistemas se ha analizado en numerosos trabajos, ya que es de uno de los factores que condicionan su capacidad para satisfacer los requerimientos de calefacción y refrigeración. Desde este punto de vista, resultan interesantes los estudios paramétricos realizados acerca del análisis de la influencia de la conductividad térmica efectiva del componente que contiene el PCM (Lin et al. 2004, Koschenz y Lehmann 2004, Tzivanidis et al. 2012, Cheng et al. 2015). Coinciden todos ellos en que, así como para valores bajos de esta magnitud su influencia en el comportamiento del sistema es notable, por encima de cierto valor, que algunos estudios sitúan en torno $1\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, no se obtiene una mejora significativa. En este último caso, la transferencia de calor pasa a estar limitada por los fenómenos de convección y radiación sobre la superficie del elemento.

A partir de estas conclusiones, y dada la baja conductividad térmica de los PCM orgánicos, los investigadores han utilizado diversas técnicas para aumentar la conductividad térmica efectiva del PCM. Por ejemplo, Zeng et al. (2009) y Cheng et al. (2015) añadieron grafito expandido al compuesto polimérico en el que se retenía el PCM (SSPCM). Por su parte, Koschenz et al. (2004) y Ansuini et al. (2012) utilizaron, respectivamente, un conjunto de aletas de aluminio y una estructura de acero galvanizado con un propósito similar. Por otro lado, el adecuado contacto térmico entre los componentes de los sistemas, especialmente en los módulos prefabricados o en aquéllos que integran PCM macroencapsulado, es uno de los aspectos que condicionan la potencia suministrada durante el proceso de liberación de la energía almacenada (Klinker et al. 2014).

Otro factor que influye tanto en la respuesta dinámica del sistema como en la potencia suministrada en condiciones estacionarias es el tipo de conductos por los que circula el fluido caloportador. Aunque predomina el uso de los tubos de polietileno reticulado ($d_t \approx 16\text{mm}$) habitualmente utilizado en sistemas tradicionales de suelo radiante, en algunos diseños se introducen los denominados tubos capilares (Koschenz y Lehman 2004, Haussmann et al. 2009, Huang et al. 2014, Zhou y He 2015) que reducen el tiempo de respuesta y aumenta la potencia suministrada en la situación estacionaria con respecto a los conductos tradicionales.

Finalmente, otra cuestión relevante que afecta a la respuesta térmica del componente, es la posición relativa del material de almacenamiento. En la configuración más frecuente, el PCM se sitúa entre los conductos de agua (o resistencias eléctricas) y la superficie expuesta al ambiente interior. Si se concibe el sistema como un circuito térmico, esta disposición supone una colocación “en serie” de la capacidad térmica asociada al PCM. Sólo en el trabajo de Huang et al. 2014, donde se utiliza una doble capa de tubos capilares, y especialmente en los de Klinker et al. 2014 y Konstantinidou et al. 2014 se propone una configuración alternativa. En esta disposición, que según la analogía planteada se puede catalogar como configuración “en paralelo”, la capa de activación térmica (circuito de agua o resistencias eléctricas) se sitúa entre el PCM y el revestimiento del elemento activo expuesto al espacio interior. En relación al sistema tradicional, esta alternativa de diseño permite, durante el proceso de carga del PCM, el suministro de una mayor potencia de calefacción o refrigeración hacia el ambiente interior (Klinker et al. 2014, Konstantinidou et

al. 2014). Por otro lado, durante el proceso de descarga de la energía almacenada, el comportamiento de ambas configuraciones es similar (Konstantinidou et al. 2014).

1.2. Patentes sobre elementos termoactivos

1.2.1. Metodología

Se ha realizado una búsqueda exhaustiva de patentes relacionadas con la incorporación de PCM a elementos termoactivos. Con este propósito se ha utilizado la base de datos Espacenet y el buscador Google Patents. Espacenet es una amplia base de datos que contiene patentes de más de 80 países recogidas desde 1836. Google Patents, por otro lado, permite la búsqueda de patentes de los Estados Unidos (United States Patent and Trademark Office, USPTO), de la Oficina Europea de Patentes (EPO) y de la Organización Internacional de la Propiedad Intelectual (WIPO). La búsqueda se ha llevado a cabo en dos etapas. En la primera, se ha realizado a través de palabras clave. A partir de esta primera selección de patentes, se ha realizado un segundo barrido de todas aquéllas que aparecían citadas.

1.2.2. Patentes sobre sistemas de calefacción o refrigeración integrados en superficies

Suelos radiantes eléctricos

De forma paralela a los trabajos de investigación, las primeras patentes relacionadas con estos sistemas se ocupan de la descripción de elementos de calefacción integrada en suelo mediante energía eléctrica. En la tabla 1.2 se recoge la principal información que se ha extraído de estas patentes y modelos de utilidad. En el primer ejemplo localizado (JPH01217135A), se propone la integración del PCM embebido en una matriz sólida (p. ej. carbono) y posteriormente encapsulado. En las siguientes patentes CN2526708Y y CN1139763C, se introduce el uso de los PCM estabilizados en matriz polimérica (SSPCM) en sendos sistemas de suelos radiantes eléctricos suspendidos. Con el objetivo de mejorar la transmisión de la energía almacenada se propone en la primera de ellas la instalación de aletas bajo la última capa de recubrimiento superficial del elemento. En la segunda, se utiliza la circulación de aire a través de hueco libre bajo la baldosa, proporcionando al sistema un funcionamiento mixto al combinar dos modos de transferencia de calor: radiación y convección forzada. Estas patentes han sido desarrolladas en el ámbito de la investigación de los ya mencionados trabajos de Lin et al. (2004), Lin et al. (2005) y Lin et al. (2007). Otro ejemplo similar se encuentra en la patente CN201751747U, en la cual se colocan placas metálicas para favorecer la transferencia de calor entre las resistencias eléctricas y el PCM.

Otros inventores se han ocupado de la descripción de sistemas modulares compactos de suelo radiante eléctrico. Por ejemplo en JP2000088263A se presenta una baldosa con calefacción eléctrica integrada que en una cavidad interior, situada bajo las resistencias eléctricas, contiene PCM. Otro sistema modular análogo se describe en la patente US7187854B2. En este invento el PCM es contenido en cápsulas esféricas rodeadas

por agua. La función del fluido es la transmisión de la energía térmica hacia las cápsulas (fig. 1.5a). Finalmente, la solicitud de patente WO2010137800A3 propone una baldosa con calefacción eléctrica en la que el PCM se halla impregnado en un material poroso.

Número	Año	Descripción del sistema	Incorporación PCM	PCM	Tm	Aplicación / Fuente de energía
JPH0121735A	1989	Suelo radiante eléctrico (instalación en seco)	s. e. (*)	Orgánico	s. e.	Nivelación de la demanda, energía solar (pasivo)
JP2000088263A	2000	Suelo radiante eléctrico, compacto y modular (integrado en la baldosa)	s. e.	s. e.	s. e.	Rehabilitación
CN2526708Y	2002	Suelo radiante eléctrico (instalación en seco)	SSPCM (poliestireno+PCM)	Parafina	s. e.	Nivelación de la demanda eléctrica
CN1369669A	2004	Suelo radiante eléctrico flotante. Sistema híbrido (radiante y convección forzada)	SSPCM (polímero+PCM)	Parafina	40-60°C	Nivelación de la demanda eléctrica
US7187854B2	2007	Suelo radiante eléctrico modular	Macro cápsulas	NaCl ₂ ·6H ₂ O	28°C	Nivelación de la demanda
WO2010137800A2	2010	Suelo radiante eléctrico integrado en la baldosa	Impregnación	PEG, PEO, PVA	20°C	s. e.
CN103776080A	2012	Suelo radiante eléctrico modular	Macro cápsulas	s. e.	25-30°C	Nivelación de la demanda

Tabla 1. 2. Listado y breve resumen de las patentes localizadas que describen sistemas de suelo radiante eléctrico con PCM. () Sin especificar, la patente no concreta información acerca de este aspecto.*

1.2.2.2. Sistemas de suelos radiantes o refrescantes activados mediante la circulación de agua

Se ha localizado un mayor número de patentes relacionadas con sistemas de suelo radiante o refrescante activados mediante la circulación de agua. En el primer ejemplo, la solicitud de patente JP2001074259A, se propone la integración de un PCM con una temperatura en torno a 20-22°C con el objetivo de reducir las cargas térmicas durante el verano y reducir las pérdidas en invierno. En la solicitud JP2005009829A se describe un sistema compacto, en el que la capa de revestimiento de madera final integra el circuito de agua –o resistencias eléctricas- y las placas que contienen PCM. Otro ejemplo de sistema de instalación en seco es el de la patente JP2008032260A. En él el PCM está contenido en los huecos de un panel de material polimérico conformado por extrusión y que es instalado entre el circuito de agua y el revestimiento del suelo (fig. 1.5b).

Dos ejemplos de suelos radiantes tradicionales, conformados *in situ*, se definen en las patentes CN201081328Y y CN100404764C. En ellas se embeben las cápsulas que contienen el PCM, esféricas o cilíndricas, en la losa de mortero durante el proceso de conformación. En cambio, en la solicitud KR20130022062A, se proponen la incorporación del PCM a este tipo de sistemas en forma de microcápsulas, constituyendo un material compuesto con el mortero. La CN203323228U introduce la modificación sobre estos sistemas tradicionales del uso de tubos capilares.

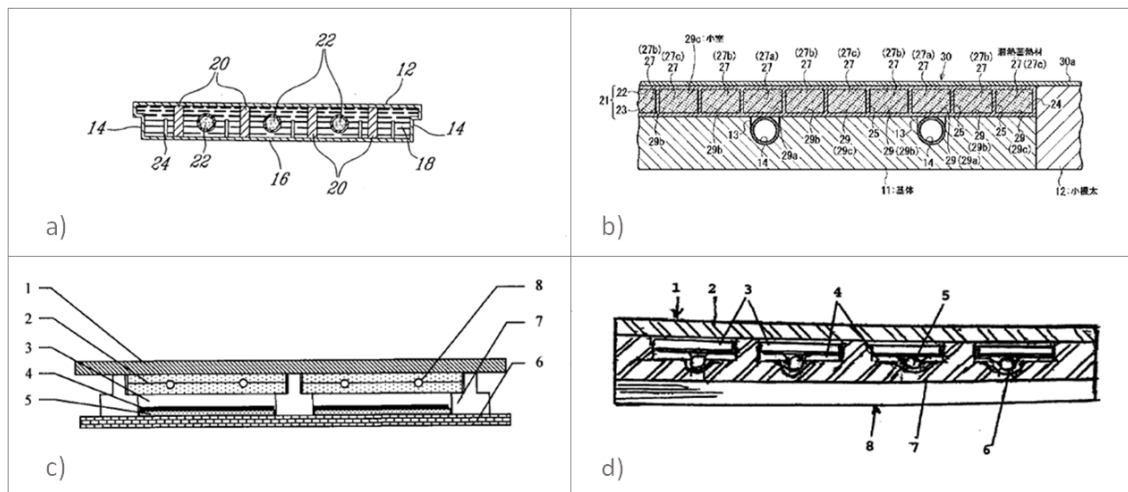


Fig. 1. 5. Croquis de la vista en sección de distintos sistemas de suelo radiante: a) módulo del sistema descrito en US7187854B2; b) elemento con panel de macrocápsulas descrito en JP2008032260A; c) suelo técnico descrito en CN201206309Y; d) sistema de instalación en seco propuesto en WO2012018254A2.

En la patente CN201206309Y se describe un sistema de suelo técnico radiante, en el que el PCM macroencapsulado o embebido en una matriz polimérica (SSPCM) se sitúa bajo la baldosa. En este caso la resistencia térmica asociada al espacio libre de aire se aprovecha para minimizar las pérdidas de la energía almacenada (fig. 1.5c). Otro ejemplo similar de suelo radiante suspendido es el presentado en la patente CN202229291U. En esta invención, se utilizan tubos capilares para favorecer la transferencia de calor hacia el PCM contenido en cápsulas flexible. Además, se contempla la utilización de dos PCM con temperaturas de cambio de fase adaptadas a las necesidades de calefacción y refrigeración respectivamente. En el sistema de suelo de instalación en seco definido en la solicitud de patente WO2012018254 A2, se propone el uso de placas metálicas horizontales para favorecer la transferencia de calor entre el fluido y las placas con PCM (fig. 5d). A partir de esta invención se desarrolló un producto comercial Unifloor PCM (Autarkis) del cual se detalla más información en la tabla 1.7.

El interés por el desarrollo de sistemas de suelo modulares se muestra en patentes como CN202023334U, donde se describe un panel hueco que contiene PCM en contacto directo con los tubos de agua que atraviesan la cavidad. En el panel modular presentado en la solicitud CN102506454A se propone el uso de tubos capilares.

Se han localizado patentes que describen sistemas de calefacción y refrigeración que incorporan el almacenamiento térmico en el suelo radiante. En la patente CN201209911Y, se describe un sistema basado de calefacción basado fundamentalmente en el aporte energético de los colectores solares –incluye un equipo de apoyo- acoplado a un suelo radiante con PCM. En este sistema no contemplan depósitos de almacenamiento adicionales. El uso de energía solar también se propone en CN102401423A y CN203215848U. En GB2490125A se describe un sistema de calefacción y refrigeración que integra diferentes fuentes de energía (solar, bombas de calor de intercambio con el terreno y almacenamiento en el terreno) acoplado a un suelo radiante con PCM. El uso del intercambio con el terreno como fuente también se propone en la patente CN203571838U. En la tabla 1.3 se resumen los aspectos principales de las patentes relacionadas con este tipo de sistemas.

Número	Año	Descripción del sistema	Incorporación PCM	PCM	T _m	Aplicación / Fuente de energía
JP2001074259A	2001	Suelo radiante	s. e.	s. e.	s. e.	Reducción de la carga de refrigeración (invierno) y de las pérdidas (verano)
KR20020079251A	2002	Suelo radiante	Macrocápsulas	s. e.	s. e.	s. e.
JP2005009829A	2005	Suelo radiante compacto de instalación en seco	Macrocápsulas	Sales hidratadas o parafina	28-31°C 15-18°C	Nivelación de la demanda, calefacción y refrigeración pasiva en los cambios de estación
JP2006046886A	2006	Lámina de material compuesto para su instalación en suelos radiantes	Material compuesto: arcilla+PCM	PCM Orgánico	25-40°C	Nivelación de la demanda, reducción de la cargas pico
JP2008032260A	2008	Suelo radiante de instalación en seco	Macrocápsulas	Sales hidratadas	40-50°C	-
CN201081328Y	2008	Suelo radiante tradicional	Macrocápsulas	Sales hidratadas	29°C	Almacenamiento de energía solar
CN100404764C	2008	Suelo radiante tradicional (losa de pequeño espesor)	Macrocápsulas	Sales hidratadas, parafinas, ácidos grasos	s. e.	Energía solar, geotérmica, caldera
CN201206309Y	2009	Suelo radiante flotante	SSPCM o macrocápsulas	s. e.	20-50°C	Almacenamiento de energía solar, nivelación de la demanda
CN201209911Y	2009	Sistema de calefacción que combina energía solar, un sistema de apoyo y un	s. e.	s. e.	25-35°C	Integración de energía solar

		suelo radiante con PCM				
CN201751747U	2011	Suelo radiante instalación en seco	SSPCM	Parafina	s. e.	Nivelación de la demanda
CN202023334U	2011	Sistema de suelo modular calentado por aire	s. e.	s. e.	20-22°C	Energía solar
WO2012018254 A2	2012	Suelo radiante compacto de instalación en seco	Macrocápsulas	CaCl ₂ ·6H ₂ O	25-35°C	Nivelación de la demanda
CN202229291U	2012	Suelo radiante de instalación en seco (tubos capilares)	Macrocápsulas	Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O, GaCl ₂ ·6H ₂ O	25-35°C	Energía solar y fuentes de baja exergía
KR20120132038 A	2012	Sistema de suelo radiante modular	s. e.	s. e.	s. e.	s. e.
CN102506454A	2012	Sistema de suelo radiante modular (tubos capilares)	Macrocápsulas	s. e.	s. e.	Energía solar, nivelación de la demanda
CN102401423A	2012	Sistema de calefacción que combina energía solar y un suelo radiante con PCM	Microcápsulas	Parafina	s. e.	Energía solar
GB2490125A	2012	Sistema de calefacción que combina energía solar, bomba de calor, almacenamiento estacional en el terreno y suelo radiante	Macrocápsulas	Sal hidratada	25°C	Energía solar térmica y fotovoltaica, bomba de calor, almacenamiento estacional en el terreno
KR20130022062	2013	Suelo radiante tradicional	Mortero y PCM microenc.	s. e.	s. e.	s. e.
CN203323228U	2013	Suelo radiante, conformación in-situ tradicional, tubos capilares	Macrocápsulas metálicas	s. e.	32-38°C 16-20°C	Energía solar, nivelación de la demanda, bomba de calor con intercambio con el terreno
CN203215848U	2013	Sistema de calefacción combinando energía solar y suelo radiante	s. e.	s. e.	s. e.	Energía solar
CN203571838U	2014	Sistema que integra el intercambio de calor con acuíferos y un suelo radiante	Macrocápsulas	s. e.	s. e.	Intercambio de calor con el terreno

Tabla 1. 3. Listado y breve resumen de las patentes localizadas que describen sistemas de suelo radiante con PCM.

Techos refrescantes

En el caso de estos sistemas, predomina el número de inventos que describen paneles modulares, que en estas superficies facilitan el proceso de montaje. En el primer ejemplo de este tipo localizado, el módulo con tubos capilares descrito en DE202005018347U1, los inventores incorporan PCM en una de las alternativas de diseño. En la patente EP1371915B1 se presenta un panel en el que el PCM contenido en depósitos flexibles se sitúa sobre el circuito instalado sobre la capa de revestimiento del sistema (fig. 1.6a). En el panel descrito en la patente DE 102006029597A1 los conductos de agua están en contacto térmico con el envés de placa metálica que forma el recubrimiento superficial y rodean los paneles que contienen PCM. Los inventores contemplan el funcionamiento híbrido (radiación y convección forzada) de este sistema de techo, al diseñar la salida de ventilación con efecto tobera de tal manera que se favorezca la circulación de aire a través del falso techo con el consiguiente intercambio de calor con el PCM. En algunas patentes - DE202013100848U1 y DE202010016878U1- se utilizan diseños en aluminio conformados por extrusión para la fabricación de los paneles, en muchos de ellos el PCM se introduce en las cavidades de estos perfiles.

Número	Año	Descripción del sistema	Integración del PCM	PCM	T _m	Aplicación / Fuente de energía
DE202005018347U1	2006	Sistema de techo técnico modular y activo para calefacción y refrigeración	s. e.	s. e.	s. e.	Fuentes de baja exergía (torre de refrigeración), nivelación de la demanda
EP1371915B1	2006	Sistema de techo técnico modular y activo para calefacción y refrigeración	Macrocapsulas	Parafina o sales hidratadas	20-22°C	Rehabilitación o edificios de nueva construcción, refrigeración gratuita
DE102006029597A1	2007	Sistema de techo técnico modular y activo para calefacción y refrigeración	Macrocapsulas	s. e.	18-25°C	Limitación de las cargas máximas, refrigeración gratuita, integración con bombas de calor, intercambio con el terreno y energía solar
DE202006007617U1	2007	Paneles termoactivos de techo o paredes con PCM	s. e.	Parafina o sales hidratadas	20-22°C	Limitación de las cargas máximas, refrigeración gratuita, evitar sobrecalentamiento
CN100347487C	2007	Paneles de techo activos de hormigón con PCM	Compuesto de hormigón y partículas de SSPCM	Parafina	15-35°C	Nivelación de la demanda

DE102007010923A1	2008	Sistema de techo activo con aire como fluido caloportador	Panel compuesto de yeso y PCM	s. e.	s. e.	Refrigeración gratuita
EP2039844A2	2009	Sistema de techo técnico modular y activo para calefacción y refrigeración	Material matriz (p. ej. yeso) + PCM microenc.	Parafina	s. e.	Control de la temperatura del ambiente interior
EP1475573B1	2009	Sistema de techo técnico modular y activo para refrigeración	Macrocápsulas	s. e.	s. e.	Mitigación de las cargas punta de climatización, refrigeración gratuita
EP20080102237	2009	Sistema activo sobre lámina de acero corrugado	Hormigón+PCM	s. e.	22°C	Techos refrescantes, instalacion en naves industriales y tejados
EP1470372B1	2010	Sistema de techo técnico modular y activo para calefacción y refrigeración	Yeso + PCM microenc. o macrocápsulas	Parafina	22°C	Rehabilitación o edificios de nueva construcción / refrigeración gratuita, fuentes de baja energía
DE202009002910U1	2010	Panel modular de techo activo	Macrocápsulas que contienen una matriz de grafito impregnada de PCM	Parafina o sales hidratadas	20-22°C	Control de la temperatura interior, bomba de calor de intercambio con acuífero
DE102009055441A1	2011	Sistema modular activo de techo o pared	Compuesto de grafito expandido y PCM	Parafina o sales hidratadas	s. e.	Reducción de la fluctuación de la temperatura interior
DE202010016878U1	2012	Sistema modular activo de techo o pared	Macrocápsulas	Parafina o acetato de sodio	23-26°C	s. e.
EP2468973A1	2012	Panel activo	s. e.	s. e.	s. e.	Reducción de las cargas máximas
DE202013100848U1	2013	Elementos longitudinales activos con PCM	Cápsulas flexibles dentro de perfiles de aluminio	s. e.	s. e.	s. e.

Tabla 1. 4. Listado y breve resumen de las patentes localizadas que describen sistemas de techo y paredes activos con PCM.

Existen otros ejemplos de patentes de techos radiantes que utilizan materiales de construcción compuestos con PCM. Por ejemplo, el sistema descrito en la patente EP2039844A2, incluye PCM microencapsulado embebido en una matriz de yeso. En él el agua circula a través de una malla de tubos capilares. Esta patente está relacionada con el sistema actualmente producido y comercializado por Ilkazell denominado “ilkatherm” (Tabla 1.7). La patente EP1470372B1 presenta distintas configuraciones de paneles. Como aspecto novedoso, incorporan estos sistemas un material para la absorción del sonido y una

capa que permite controlar el flujo de calor desde el material de almacenamiento hasta el ambiente interior (elemento con la referencia 24 de la figura 1.6b). Este último componente contiene un material flexible mediante cuyo estado de deformación se puede variar el coeficiente equivalente de transferencia de calor del elemento. Al igual que en el caso anterior, los inventores proponen la inclusión de PCM microencapsulado en una matriz de material sólido (p.ej. yeso). Mencionan la posibilidad de añadir partículas de grafito para aumentar la conductividad efectiva del material compuesto con PCM y de materiales retardantes de llama para mejorar el comportamiento ante el fuego. El trabajo de investigación relacionado con el diseño y el ensayo a escala de laboratorio de una de estas configuraciones propuestas se describe en el artículo de los mismos inventores (Koschenz y Lehman, 2004). Otros inventores proponen el uso de compuestos de hormigón y PCM (CN100347487C).

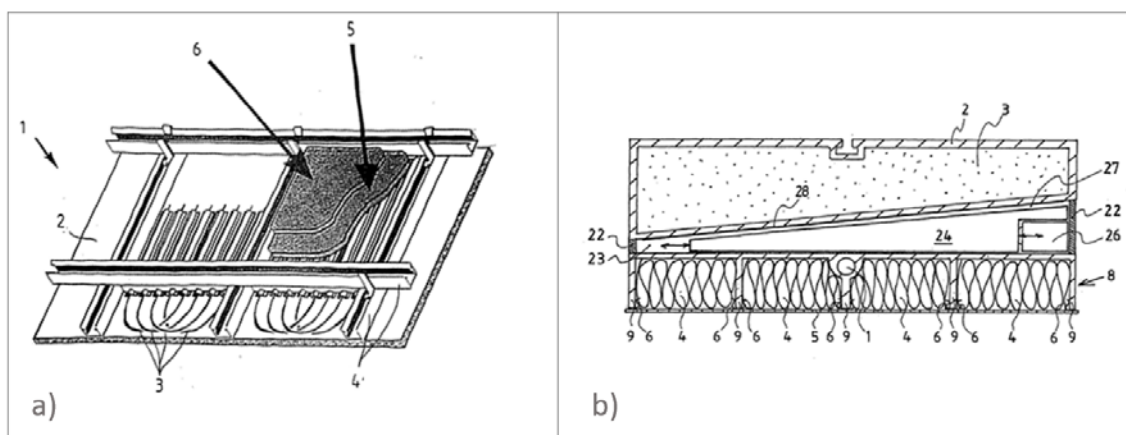


Fig. 1. 6. Representación del panel de techo descrito en EP1371915B1. b) vista en sección de una de las propuestas de módulo de techo refrescante propuesto en EP1470372B1.

En otros inventos, como los descritos en la patente DE202009002910U1 y la solicitud DE102009055441A1, el PCM se embebe en una matriz de grafito que favorece la transferencia de calor. En esta última se añade un material para la absorción del sonido. De nuevo, el resumen de los principales aspectos de las patentes relacionadas se presenta en la tabla 1.4.

1.2.3. Análisis de las patentes revisadas

Se ha localizado un total de 43 patentes, modelos de utilidad y solicitudes relacionadas con la aplicación del almacenamiento térmico con PCM en superficies interiores térmicamente activadas para calefacción y refrigeración. En los inventos revisados predominan los diseños de sistemas de instalación en seco o los constituidos en forma de paneles modulares, que, con respecto a los elementos más tradicionales presentan la principal ventaja de la reducción de los tiempos de montaje. Conviene destacar, sin embargo, que la muestra obtenida dentro del ámbito de las invenciones tiene, desde el punto de vista del tipo de sistema, un cierto sesgo, ya que las posibilidades para realizar

nuevos desarrollos y variantes en el diseño son mucho más amplias dentro de los componentes prefabricados o modulares.

Las patentes y modelos de utilidad revisadas no suelen detallar el PCM concreto que debe utilizarse en los sistemas descritos. Predomina el uso de parafinas y sales hidratadas aunque en pocas ocasiones se hace referencia a los problemas particulares de cada tipo de material. Por otro lado, teniendo en cuenta los principales parámetros de diseño del sistema de almacenamiento (temperatura de cambio de fase y capacidad de almacenamiento), no siempre se proporciona esta información y sólo en la solicitud JP2001074259A se justifica este dimensionado a partir de resultados numéricos. Existe, además, una gran variabilidad de temperaturas de cambio de fase para su aplicación en calefacción (25-50°C). Algunas patentes proponen la incorporación de dos PCM en el mismo sistema para mejorar el funcionamiento en ambos modos (15-20°C y 25-30°C) (JP2005009829A, CN203323228U). Por otro lado, sólo en la patente JP2001074259A se proporciona información acerca de la capacidad de almacenamiento latente del sistema propuesto.

En los sistemas descritos predomina la integración del PCM encapsulado, aunque existen algunas patentes que utilizan SSPCM (CN2526708Y, CN1369669A, CN201206309Y, CN201751747U), materiales de construcción con microcápsulas dispersas (CN203571838U, EP2039844A2, EP1470372B1) o matrices de carbono con PCM impregnado (DE202009002910U1, DE102009055441A1).

La forma y posición de las cápsulas o materiales compuestos que contienen el PCM tiene una influencia relevante en la transferencia de calor del elemento (emisión térmica del elemento y respuesta dinámica). Aunque en unos pocos ejemplos se utilizan cápsulas de geometría cilíndrica (US7187854B2, CN100404764C), predomina el diseño en forma de placas, que se disponen formando una de las capas que componen el sistema. La posición relativa de las placas, que influye en la respuesta dinámica del sistema y en la liberación de la energía almacenada, varía según los diseños. De forma más habitual se coloca la capa con PCM entre el circuito que activa el elemento y la superficie de revestimiento (configuración serie). En cambio, en las patentes JP2000088263A, CN201081328Y, EP1371915B1 y DE102006029597A1 son los conductos los que se colocan entre la superficie de revestimiento y el material de almacenamiento (configuración paralelo). Finalmente, existen ejemplos en las que se emplea una disposición intermedia, insertando los tubos (o resistencias térmicas) en la línea media de la capa que contiene el PCM (p. ej. CN201206309Y, CN202023334U).

Algunas patentes y modelos de utilidad contemplan técnicas para mejorar la conductividad térmica efectiva del elemento. Tal es el caso de JP2008032260A, CN201206309Y, CN201751747U, WO2012018254A2, DE202006007617U1 en las que se utilizan elementos metálicos horizontales que favorecen la difusión del calor, o de CN2526708Y, CN1369669A, US7187854B2, EP1475573B1, EP1470372B1, DE202010016878U1, EP2468973A1 donde un sistema de aletas que favorece la transferencia de calor en las cápsulas con PCM. La adición de un material conductor térmico como el grafito se propone en DE202009002910U1, DE102009055441A1, EP1470372B1. Por otro lado, la instalación de tubos capilares para mejorar la emisión térmica del elemento

se ha propuesto en numerosas patentes (CN203323228U, CN102506454A, CN202229291U, DE202005018347U1, EP2039844A2, EP1470372B1).

1.3. Incorporación de los PCM en materiales de construcción

En esta sección se revisan las principales técnicas que se han investigado para la integración de los PCM a los elementos de construcción. Esta revisión se ha orientado específicamente hacia las técnicas de incorporación de estas sustancias en materiales que pueden ser utilizados en la edificación. Pese a que algunos autores han investigado sobre el uso de macrocápsulas en elementos constructivos, e incluso existen numerosas patentes y algunos sistemas comerciales que emplean esta tecnología, se ha considerado que para el sistema que se propone en esta tesis presenta importantes desventajas. En una aplicación general, el encapsulado debe cumplir los siguientes requerimientos principales: facilitar la transferencia de calor a través de un diseño térmico adecuado, ser químicamente compatible con los materiales, ser capaz de absorber las variaciones de volumen asociadas al cambio de estado y evitar el fugado del material (Agyenim et al. 2010). Dada la baja conductividad térmica de los PCM orgánicos, la acumulación de volúmenes importantes del material en las cápsulas dificulta la transferencia de calor. De este modo, el diseño adecuado y específico de estos recipientes puede resultar un aspecto crucial. Por otra parte, dentro del ámbito de la edificación, la viabilidad constructiva de estos sistemas es otro factor crítico, ya que la integración de las macrocápsulas a las técnicas convencionales de construcción es compleja (Navarro et al. 2015). Por ejemplo, algunos autores señalan el peligro de que las cápsulas se dañen durante alguno de los procesos habituales -tan simples como el mecanizado de agujeros- utilizados en la construcción (Schossig et al. 2005, Navarro et al. 2015). Finalmente, el incremento del coste del sistema asociado al encapsulado -y a su integración dentro del elemento constructivo- es otro de los aspectos críticos, tal y como afirmaron Schossig et al. (2005) y, más recientemente, Salumkhe y Shabeka (2012).

Así pues, el objetivo en esta sección es, además de conocer las técnicas disponibles para la formación de materiales compuestos con PCM que puedan ser integrados en la construcción, analizar las características y propiedades de éstos desde el punto de vista de su aplicación a los elementos termoactivos. A través del trabajo de revisión llevado a cabo, se ha confeccionado la tabla 1.5, donde se recoge la principal información relativa a estos materiales compuestos.

Dentro de este conjunto de aplicaciones relacionadas con la edificación, ha sido más frecuente el uso de PCM orgánicos. Frente a los inorgánicos, esta familia de materiales presenta la ventaja de evitar los problemas relacionados con la corrosión, el subenfriamiento y la segregación de fases (Cabeza et al. 2011). Los materiales compuestos con almacenamiento de energía latente se pueden agrupar en grandes familias, en atención al material matriz que retiene al PCM en su estructura sólida. Por una parte, se ha estudiado su incorporación a materiales tradicionales de construcción como el hormigón, mortero y las placas de yeso. En estos compuestos, se utiliza la técnica de la microencapsulación y de los materiales porosos impregnados para mitigar la migración de la sustancia en fase líquida. Por otra parte, se ha propuesto su integración en una matriz de material polimérico formando los denominados SSPCM.

La adición de PCM orgánicos en elementos de construcción implica un empeoramiento de su comportamiento ante el fuego. Aunque su incorporación a un sustrato no inflamable puede mitigar este efecto negativo (Hawes et al. 1991), esta característica de los compuestos debe ser analizada. Sin embargo, las investigaciones realizadas hasta el momento, más centradas en la preparación de materiales, análisis de comportamiento térmico o estudio de las propiedades termofísicas y mecánicas, generalmente no han prestado atención, hasta el momento, a este aspecto.

1.3.1. Hormigón y PCM

El interés por la incorporación de los PCM a compuestos de hormigón ha estado motivado principalmente por el aumento de la inercia térmica de componentes estructurales en aplicaciones tanto pasivas (p. ej. Cabeza et al. 2007) como activas (p. ej. Pomianowski et al. 2012). Además, algunos investigadores han señalado su potencial aplicación para evitar la congelación del agua en elementos estructurales expuestos al ambiente (Bentz y Turpin 2007) o para la reducción, a través de la capacidad térmica mejorada, de la temperatura que se alcanza durante la hidratación del cemento (Hunger et al. 2009). Estas últimas aplicaciones están, sin embargo, muy condicionadas por el efecto dominante del PCM en la reducción de la resistencia mecánica hormigón (aspecto que se discute en los siguientes párrafos).

Se han empleado distintas técnicas para la incorporación de PCM en hormigones y morteros para su uso en la edificación. En los primeros trabajos relacionados con estos materiales compuestos se propuso la impregnación de bloques prefabricados de hormigón (Hawes 1991, Lee et al. 200) mediante su inmersión en el PCM líquido. Debido a la pequeña porosidad de estos materiales, la cantidad de PCM absorbida es limitada, en torno al 5% en masa (Hawes, 1991). Esta técnica presenta la principal desventaja de no impedir el fugado del PCM. Por el contrario, la incorporación en forma de microcápsulas puede minimizar este efecto (Schossig et al. 2005). En este caso, la adición del material se realiza sobre la masa fresca de hormigón o mortero. A partir de los primeros estudios publicados sobre este tipo de compuestos con microcápsulas (Cabeza et al. 2007), en los últimos años se han realizado un significativo número de trabajos sobre la preparación y análisis de propiedades (térmicas, mecánicas y estudios de compatibilidad química) de hormigones y morteros con PCM microencapsulado. Mediante este procedimiento se pueden obtener unas fracciones máximas del PCM en el compuesto de hasta el 5% en hormigones (Hunger et al. 2009, Entrop et al. 2011, Eddhahak-Ouni et al. 2014, Pomianowski et al. 2014) y el 25% en morteros para albañilería (Vaz Sá et al. 2012, Lucas et al. 2013). De un modo general, la incorporación de las microcápsulas reduce la densidad aparente del material, su conductividad térmica y la resistencia mecánica a flexión y compresión. Este último aspecto resulta crítico en componentes estructurales. Los investigadores atribuyen este deterioro a dos principales factores: por un lado, las microcápsulas se comportan a efectos resistentes de manera similar a los poros ocupados por aire (Lecompte et al. 2015), mientras que, por otro lado, la presencia de PCM, fugado de las cápsulas que han sido dañadas en el proceso, dificulta e impide la hidratación en algunas partículas (Hunger et al. 2009). El efecto combinado de ambos fenómenos produce una reducción drástica de las prestaciones mecánicas, que

oscila, por ejemplo, para un hormigón con un contenido del 5% en PCM, entre la pérdida del 30% (Eddhahak-Ouni et al. 2014) y el 60% (Hunger et al. 2009) de la resistencia a compresión a los 28 días. No obstante, algunos autores consideran aceptable este deterioro para determinadas funciones estructurales, ya que la resistencia a compresión a los 28 días se puede llegar a mantener -para hormigones con un 5% de PCM- entre los 20 y 30MPa (Cabeza et al. 2007, Hunger et al. 2009, Lecompte et al. 2015).

Otra técnica que ha sido aplicada para la incorporación de los PCM a hormigones y morteros se basa en su impregnación, en una primera etapa, en materiales porosos que posteriormente formarán parte de los agregados del nuevo material de construcción. En los últimos años se ha publicado un elevado número de trabajos sobre la síntesis y análisis de las propiedades de este tipo de compuestos. En éstos, se emplean gránulos de materiales porosos -algunos de ellos ya utilizados para la conformación de hormigones ligeros (Winter y Nilson 1986)- para absorber el PCM: pizarra expandida (Hawes 1991, Bentz y Turpin 2007, Zhang et al. 2004), mezclas de piedra pómez (Hawes 1991, Sakulich y Bentz 2012), diatomita (Xu y Li 2013, Li et al. 2014), arcilla expandida (Zhang et al. 2004, Sakulich y Bentz 2012, Sharifi y Sakulich 2015, Cui et al. 2015), vermiculita expandida (Kheradmand et al. 2015), perlita expandida (Kheradmand et al. 2015) y grafito expandido (Kim et al. 2014 y 2014b, Zhang et al. 2013, Li et al. 2013). Asimismo, Mehling et al. (2003) estudiaron las propiedades térmicas de hormigones ligeros con virutas de madera con el PCM granulado del fabricante Rubitherm (GR42 y GR50). La capacidad de absorción de PCM de estos materiales oscila, si el proceso se realiza en condiciones de vacío, entre el 50% (Xu et al. 2013, Cui et al. 2015) y 85% (Zhang et al. 2013) de la masa total del compuesto impregnado. Así pues, mediante la posterior incorporación de estos gránulos para la formación del hormigón es posible alcanzar una proporción en masa del PCM sobre el total del material de construcción de hasta el 10-20% (Zhang et al. 2004). Habitualmente, en estos compuestos la retención del PCM se confía a la capacidad de absorción del material poroso; tan sólo en el trabajo de Kheradmand et al. (2015) se propone el recubrimiento con un material impermeable al agua de los gránulos para evitar el posible fugado. Como ocurre con los compuestos obtenidos mediante la anterior técnica, la presencia de PCM provoca en éstos la reducción de conductividad térmica y de densidad. Asimismo, según los ensayos de resistencia mecánica presentados por los investigadores (Sakulich y Bentz 2012, Xu et al. 2013), el deterioro de estas propiedades es similar al de los compuestos que utilizan PCM microencapsulado.

Aunque la tendencia de las propiedades termofísicas y de las características de estos compuestos al incorporar PCM es conocida, es difícil hacer una predicción exacta de esta variación a partir de los resultados publicados hasta el momento. Por ejemplo, en el caso de la conductividad térmica y la densidad, existe una influencia importante de la porosidad del material (Hunger et al. 2009). Esta característica puede variar según el procedimiento de conformación del compuesto y la técnica utilizada para la integración del PCM. De esta forma, las correlaciones o modelos que han presentado algunos investigadores, como Lecompte et al. (2015), Pomianowski et al. (2012) o Meshgin et al. (2013), para evaluar la conductividad térmica, tienen un carácter específico para la descripción de un tipo de material particular. Resulta conveniente, por tanto, analizar las propiedades termofísicas y características de los materiales que se utilicen en cada caso.

1.3.2 Compuestos con yeso

Los primeros ejemplos dentro de esta familia de materiales se obtuvieron mediante impregnación (Shapiro et al. 1987) e incorporación directa (Feldman et al. 1991, Feldman et al. 1995). Aunque en estos trabajos de investigación no se observó fugado del PCM, degradación con el ciclado térmico ni incompatibilidad con los recubrimientos habituales, todos los trabajos de investigación en estos materiales realizados a partir de la primera mitad de la década del 2000, se han centrado principalmente en su integración a partir de microcápsulas (Schossig et al. 2005).

Estos materiales han suscitado en los últimos años un gran interés porque posibilitan la incorporación del PCM en los revestimientos interiores –placas prefabricadas de yeso- con el objetivo de reducir la fluctuación de la temperatura interior del edificio. La matriz de yeso admite en torno a un 20-25-30% en masa de PCM microencapsulado (Schossig et al. 2005, Jaworski et al. 2011, Shukla et al. 2012). Sin embargo, algunos trabajos muestran que si el material matriz se refuerza por medio de la adición de fibras de polipropileno (Oliver et al. 2009) o vidrio (Zhang et al. 2012) se pueden alcanzar mayores proporciones de PCM, en torno al 45-50%.

De manera análoga a los compuestos con hormigón, la presencia del PCM reduce las prestaciones mecánicas del material. En este caso, sin embargo, la disminución es más leve, de tal manera que los compuestos obtenidos satisfacen los requerimientos resistentes habitualmente exigidos (Oliver et al. 2009, Borreguero et al. 2014).

1.3.3 PCM orgánicos integrados en una matriz polimérica

En los SSPCM, el material se halla retenido en una matriz polimérica. Este compuesto se conforma a partir de la mezcla del polímero y el PCM orgánico -parafinas, más frecuente, o ácidos grasos (Alkan y Sari, 2008)- en estado fundido (Inaba y Tu 1998). Se pueden utilizar distintos polímeros como material de soporte: polietileno de alta densidad (HDPE) (Inaba y Tu 1998, Sari 2004, Cheng et al. 2010), copolímero estireno-butadieno-estireno (SBS) (Xiao et al. 2002, Zhang et al. 2006, Wang et al. 2015) y polimetilmetacrilato (PMMA) (Alkan y Sari 2008). Los investigadores que se han ocupado del desarrollo de estos materiales aseguran que es posible alcanzar un contenido de PCM de hasta el 80% sin que se produzca fugado (Sari 2004). En relación a la transferencia de calor en elementos de construcción activos, estos compuestos presentan la desventaja de tener una conductividad térmica baja (Zhang et al. 2006). Por este motivo, parte del trabajo acerca de estos materiales se ha centrado en la mejora de su conductividad térmica mediante la incorporación de aditivos: grafito (Sari 2004, Zhang et al. 2006b, Cheng et al. 2010) o grafito expandido (Xiao et al. 2002, Cheng et al. 2010). Son prometedores los resultados de Cheng et al. (2010) en los que se obtiene una conductividad térmica de $1,3\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ con la adición de un 4% de grafito expandido.

El aspecto más crítico de estos compuestos para su incorporación dentro de los elementos de construcción es el comportamiento ante el fuego, debido a que tanto el PCM como su soporte son materiales inflamables. De este modo, algunos trabajos se han dedicado a la búsqueda de aditivos que mejoren esta característica del material (Cai et al. 2007, Cai et al. 2008, Zhang et al. 2010, Sittisart y Farid 2011, Wang et al. 2015).

Material	Principales propiedades	Ventajas	Desventajas / Aspectos susceptibles de mejora / Factores críticos
Hormigón con PCM añadido por impregnación	$x_{PCM} \approx 5\%$ $h_m \approx 7 \text{ kJ/kg}$ (Hawes 1991) $\lambda \approx 0,8-0,9 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ (Hawes 1991)	-Químicamente estables (Hawes 1991) -No hay deterioro de las prestaciones mecánicas (Hawes 1991)	-Contenido en PCM reducido (5%) -Procedimiento limitado a componentes prefabricados -Posible fugado, dependiendo de la porosidad del material matriz (Lee 1998)
Hormigón con PCM microencapsulado (Cabeza et al. 2007, Hunger et al. 2009, Pomianowski et al. 2012, Eddhahak-Ouni et al. 2014)	$x_{PCM} \approx 5\%$ $h_m \approx 5 \text{ kJ/kg}$ $\rho \approx 2000 \text{ kg/m}^3$ $\lambda \approx 1,6 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ (Pomianowski et al. 2012) – 2,1 (Hunger et al. 2009)	-Minimización del fugado -Las parafinas son químicamente estables en el entorno alcalino (Hawes 1991)	-Contenido en PCM reducido (5%) -Disminución de la conductividad térmica y de la densidad (4) Aspectos susceptibles de un estudio más profundo: -Rotura de las microcápsulas debido al entorno alcalino y a las acciones mecánicas de abrasión o colisión entre partículas (Hunger et al. 2009, Lecompte et al. 2009): influencia en el posible fugado. Aspectos susceptibles de mejora: -Cápsulas con más resistencia (química y mecánica) (Hunger et al. 2009) o proceso de fabricación. -Resistencia al fuego Factores críticos: -Deterioro de las propiedades mecánicas a causa de la capacidad resistente nula de los PCM (Lecompte et al. 2015) y de su interacción durante el proceso de hidratación (Hunger et al. 2009)
Morteros de albañilería con PCM microencapsulado (Vaz Sá et al. 2012, Lucas et al. 2013, Joulin et al. 2014, Kheradmand 2014, Lecompte et al. 2015)	$x_{PCM} \approx 15\%$ (Lecompte et al. 2015) – 25% (Vaz Sá et al. 2013) $h_m \approx 25 \text{ kJ/kg}$ $\rho \approx 1200 \text{ kg/m}^3$	-Minimización del fugado -Las parafinas son químicamente estables en el entorno alcalino (Hawes 1991) -Mayor contenido en PCM (15%)	-Densidad y conductividad térmica bajas Factores críticos: -En los morteros, el PCM aumenta notablemente la retracción, por lo que es preciso ajustar la formulación del compuesto

⁴ La reducción de la conductividad térmica y de la densidad en estos materiales no es siempre una desventaja. En este caso se considera así ya que se analiza desde el punto de vista de su aplicación a un elemento termoactivo.

	$\lambda \approx 0,3 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ (Vaz Sá et al. 2013, Joulin et al. 2014) – $0,6 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ (Lecompte et al. 2015)		para minimizar el problema (Vaz Sá et al. 2012)
Hormigones y morteros con materiales porosos	$x_{\text{PCM}} \approx 9\%$ (Cui et al. 2015)-12% (Hawes et al. 1991) – 18% (Zhang et al. 2004) $h_m \approx 11 \text{ kJ/kg}$ (Zhang et al. 2004, Li et al. 2013)-17kJ/kg (Cui et al. 2015) $\rho \approx 1400 \text{ kg/m}^3$ (Cui et al. 2015, Li et al. 2013) $\lambda \approx 0,6 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ (Cui et al. 2015)	-Compatibilidad química con el hormigón (Hawes 1991) y el sustrato poroso (diatomita, Xu et al. 2013; grafito expandido, Kim et al. 2014) -Estabilidad frente al ciclado (Zhang et al. 2013, Lin et al. 2013) -Mayor contenido en PCM (9-18%)	-Disminución de la conductividad térmica y de la densidad Aspectos susceptibles de mejora: -Recubrimiento de los gránulos para evitar la difusión del PCM (Kheradmand 2015, Cui et al. 2015) -Control de la exudación en los gránulos de material poroso (Li et al. 2013, Cui et al. 2015) Factores críticos: -Algunos PCM se degradan (p. ej. BS y PEG) , durante la hidratación, en un entorno alcalino (Hawes 1991, Lee 1998) -Deterioro de las propiedades mecánicas a causa de la capacidad resistente nula de los PCM: causas mecánicas y químicas (Sakulich y Bentz 2012) (similar a los compuestos con microencapsulado)
Yeso con PCM impregnado, obtenido por incorporación directa (Feldman et al. 1990, Feldman et al. 1995, Banu et al. 1998) o por inmersión (Saphiro et al. 1987)	$x_{\text{PCM}} \approx 20\text{-}25\%$ $h_m \approx 30 \text{ kJ/kg}$ (Feldman et al. 1990) $\rho \approx 700 \text{ kg/m}^3$ (Feldman et al. 1990) $\lambda \approx 0,2 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$	-No se observa exudación (Saphiro et al. 1987, Feldman et al. 1990) -No se observa incompatibilidad con los recubrimientos habituales (Feldman et al. 1990) -Durabilidad frente a los ciclos fusión-solidificación (Feldman et al. 1990)	Aspectos susceptibles de estudios más profundos: -Comportamiento ante el fuego
Yeso con material micro encapsulado	$x_{\text{PCM}} \approx 15\%$ (Borreguero et al. 2014b)-25-30% (Shukla et al. 2012, Jaworski et al. 2011) – 45-50% (Oliver et al. 2012, Zhang et al. 2012) $h_m \approx 28 \text{ kJ/kg}$ (Shukla et al. 2004, Li et al. 2013)- 47kJ/kg (Oliver et al. 2009) - 65kJ/kg (Zhang et al. 2012)	-La leve reducción de las propiedades mecánicas, resistencia a flexión y compresión, permite el cumplimiento de los requerimientos del producto (p. ej. EN 13279: Oliver et al. 2012, Borreguero et al. 2014b) -La adición de fibras (polipropileno o vidrio) permite la inclusión de hasta un 50% en peso de PCM (Oliver et al. 2012, Zhang et al. 2012)	-Baja conductividad térmica Aspectos susceptibles de mejora: -Rotura de las microcápsulas (Oliver 2009) Aspectos susceptibles de estudios más profundos: -Comportamiento ante el fuego

	$\rho \approx 710 \text{ kg/m}^3$ (Oliver et al. 2009) - 1100 kg/m^3 (Borreguero et al. 2014) $\lambda \approx 0,2-0,3 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ (Borreguero et al. 2014, Zhang et al. 2012)		
SSPCM	$x_{\text{PCM}} \approx 80\%$ $h_m \approx 120-160 \text{ kJ/kg}$ $\rho \approx 900 \text{ kg/m}^3$ $\lambda \approx 0,15 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ (Zhang et al. 2006b)-0,3 (Cheng et al. 2010)	-Elevado contenido en PCM -Químicamente compatible (Alkan y Sari, 2008, Cheng et al. 2010)	-Baja conductividad térmica -No pueden tener una función estructural Aspectos críticos: -Material inflamable

Tabla 1. 5. Principales características de los materiales compuestos con PCM utilizados en el ámbito de la construcción.

1.4. Materiales y elementos de construcción activos actualmente comercializados

En esta sección se reúnen los materiales o sistemas de construcción actualmente comercializados que incorporan PCM. La tabla 1.6 recoge las principales características de los compuestos y elementos de construcción que han sido encontrados. En líneas generales, predominan los productos en los que el PCM se integra en los revestimientos interiores prefabricados del edificio (p. ej. paneles de yeso o placas de techo técnico). Asimismo, la microencapsulación es la tecnología más utilizada para retener el PCM; muchos de los productos están desarrollados a partir de las microcápsulas del fabricante BASF. Estos materiales suelen estar enfocados a aplicaciones pasivas en las que la inercia térmica adicional favorezca la estabilización de la temperatura del ambiente interior. Sin embargo, algunos fabricantes mencionan la posibilidad de activar mediante la instalación de tubos algunos de sus productos (EBB, ThermaCool, SGL).

Por otro lado, en lo que concierne a la reacción al fuego, se evidencia en la hoja de características que acreditan los fabricantes el deterioro de este aspecto del comportamiento de los materiales asociado a la adición de PCM. Por ejemplo, en el caso de las placas de yeso laminado, el producto convencional del fabricante Knauf (Standar A) se cataloga (según la norma EN 13501-1) como A2-s1, d0 (no combustible-producción baja de humos, no desprende partículas inflamadas), mientras que el sistema que incorpora PCM (Confortboard) está clasificado como D-s1, d0 (combustible, contribución media al fuego). De forma general, predomina la catalogación de estos materiales y sistemas (según la norma EN 13501-1) dentro de la categoría D y su emisión de humos suele ser media (s2) o baja (s1). Es preciso señalar que, si se tienen en cuenta las exigencias del Código Técnico de la Edificación (CTE) vigente en España (tabla 4.1, DB-SI), su aplicación quedaría fundamentalmente restringida al espacio interior de la vivienda⁵.

Producto (Patente)	Fabricante	Descripción	Incorporación PCM/ tipo de material	Principales características
ECOM4TILE, WO2012095547A, 2012	Ceracasa www.ceracasa.com (España)	Baldosa cerámica	Cerámica+aglutinante + PCM microencapsulado	-
Comfortboard	Knauf www.knauf.es (Alemania)	Panel de yeso para el revestimiento interior	Yeso+PCM microencapsulado (Micronal, BASF)	$T_m=23^{\circ}\text{C}$ $\Delta h \approx 200\text{kJ/m}^2$ Reacción al fuego: D-s1, d0 (EN 13501-1)
Alba Balance	Rigips Grupo Saint Gobain www.rigips.de (Alemania)	Panel de yeso para el revestimiento interior	Yeso+PCM microencapsulado (Micronal, BASF)	$T_m=23 \text{ ó } 26^{\circ}\text{C}$ $\Delta h \approx 300\text{kJ/m}^2$ B-s2, d0 (EN 13501-1)

⁵ El documento del CTE dedicado a la seguridad en caso de incendio (DB-SI), en su tabla 4.1, ya establece que, dentro de los elementos constructivos sujetos a requisitos de reacción al fuego, para los revestimientos de las zonas ocupables (categoría de elementos de edificación sometida al criterio menos exigente), es necesaria una clasificación mínima de C,s2-d0 (combustible, contribución limitada al fuego) (EN 13501-1). No obstante, el espacio interior de la vivienda queda excluido de la tabla 4.1 en la que se fijan estas exigencias.

ThermaCORE US4747240A, 1988	National Gypsum www.nationalgypsum.com (EEUU)	Panel de yeso para el revestimiento interior	Yeso+PCM microencapsulado (Micronal, BASF)	$T_m=23 \text{ ó } 26^\circ\text{C}$ $\Delta h \approx 260 \text{ kJ/m}^2$ Clase B (combustible) ASTM E 136
ThermaCool Panel	Thermacool www.thermacool.es (Reino Unido)	Panel de yeso para el revestimiento interior	Yeso+PCM microencapsulado (Micronal, BASF)	$T_m=23^\circ\text{C}$ $\Delta h \approx 560 \text{ kJ/m}^2$ Reacción al fuego: D-s2, d0 (EN 13501-1)
Amstrong CoolZone	Armstrong www.armstrong.co.uk (Reino Unido)	Placa para techos suspendidos	Yeso+PCM microencapsulado (Micronal, BASF)	$T_m=23^\circ\text{C}$ $\Delta h \approx 500 \text{ kJ/m}^2$ Reacción al fuego: D-s1, d0 (EN 13501-1)
Scherff Clima- Akustikputz PCM, DE102010047673 A1, 2012	Scherff www.scherff.de (Alemania)	Panel de revestimiento de techo	Mortero de yeso + PCM microencapsulado (Micronal, BASF)	$T_m=23^\circ\text{C}$ $\Delta h \approx 200 \text{ kJ/m}^2$ Reacción al fuego: D-s1, d0 (EN 13501-1)
EBB PCM Clay Board 23/25	Eco Building Boards www.ecobuildingboards.weebly.com (Reino Unido)	Panel de revestimiento para paredes y techos	Arcilla + PCM microencapsulado (Micronal, BASF)	$T_m=23 \text{ ó } 26^\circ\text{C}$ $\Delta h \approx 110 \text{ kJ/m}^2$
Weber.mur Clima 26	Weber Saint Gobain www.e-weber.com (Francia)	Preparado de yeso y PCM para su aplicación <i>in situ</i>	Yeso+PCM microencapsulado (Micronal, BASF)	$T_m=23 \text{ ó } 26^\circ\text{C}$ $\Delta h \approx 18 \text{ kJ/kg}$
Enerciel PCM	Winco technologies www.enerciel-pcm.fr (Francia)	Preparado de yeso y PCM para su aplicación <i>in situ</i>	Yeso+PCM microencapsulado	$T_m=23^\circ\text{C}$ $\Delta h \approx 20 \text{ kJ/kg}$
Ecophit LC WO2011124624 A1, 2011	Grupo SGL www.ecophit.com/ (Alemania)	Panel de grafito expandido con PCM	Grafito expandido (15%) + PCM (85%)	-
Energain US8333903 B2, 2012	Dupont http://energain.co.uk/ (EEUU)	Panel de revestimiento interior	SSPCM (40% polímero + 60% PCM, recubierto de lámina de aluminio)	$T_m=21^\circ\text{C}$ $\Delta h \approx 300 \text{ kJ/m}^2$ Reacción al fuego: Clase E (EN ISO 11925-2) Clase 1 (BS476-7) Clase E (EN 13501-1)
DeltaCool 24	Dörken www.doerken.com (Alemania)	Placa de techo suspendido	PCM inorgánico (sal hidratada) macroencapsulado	$T_m=22-28^\circ\text{C}$
BioPCMat US20150056404 A1, 2015	Phase Change Energy Solutions www.phasechange.com (EEUU)	Lámina de PCM macroencapsula do	PCM orgánico macroencapsulado	$T_m=23, 25 \text{ ó } 27^\circ\text{C}$ $\Delta h \approx 500, 800 \text{ ó } 1300 \text{ kJ/m}^2$

Tabla 1. 6. Recopilación de materiales y sistemas comercializados que permiten la inclusión de PCM en la edificación.

En el caso de los elementos de construcción termoactivos, existe un menor número de ejemplos. En la tabla 1.7 se recogen las características más relevantes de cada sistema junto con las patentes relacionadas. En torno a fabricantes de PCM como Autarkis, Phase Change Energy Solutions y Rubitherm se han desarrollado o propuesto sistemas de suelo radiante que incorporan PCM en macrocápsulas, en el caso de los dos primeros, o gránulos (Rubitherm). Por otro lado, otras empresas se han dedicado al desarrollo de sistemas de modulares de panel de techo refrescante en los que se incorpora el PCM mediante la formación de un compuesto con yeso (Ilkatherm, fig. 1.7c, y EmcoCool, fig. 1.7d), embebido en una matriz de grafito (Ecophit Cooling, fig. 1.7b) o macroencapsulado en placas de aluminio (producto desarrollado por EBB).

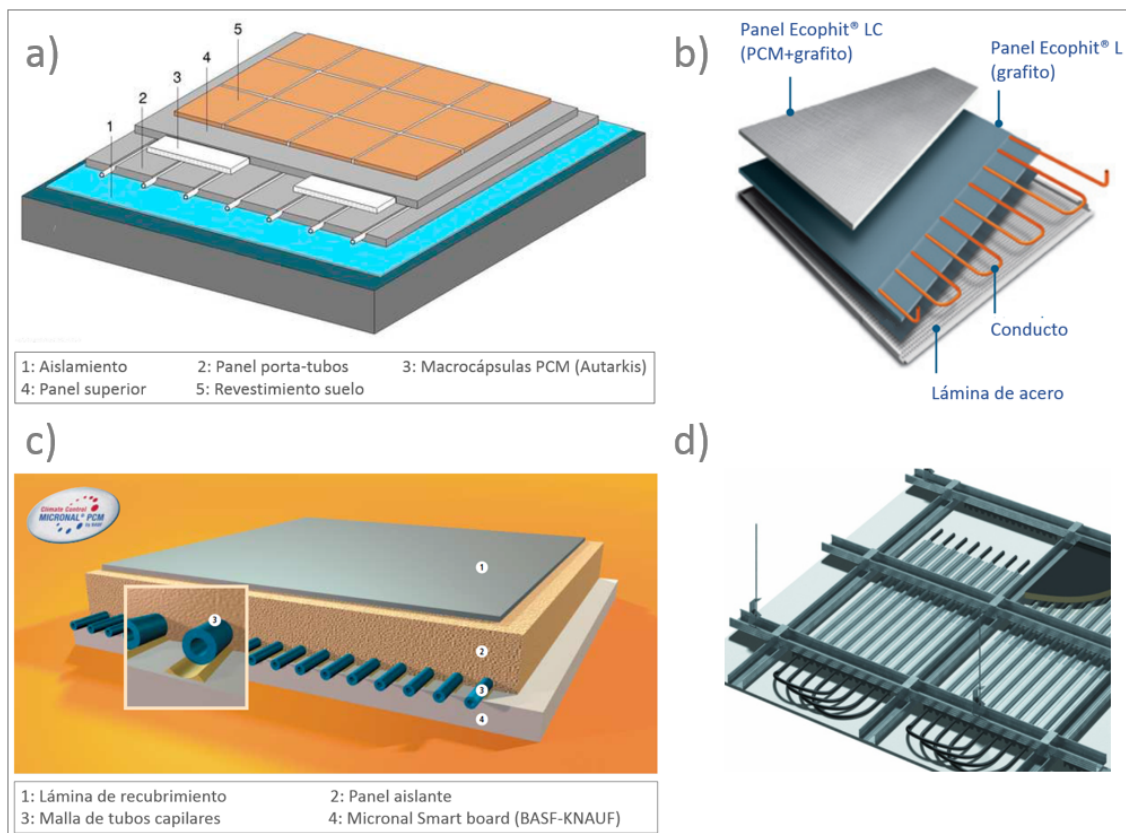


Fig. 1. 7. Sistemas comerciales de calefacción o refrigeración integrados en las superficies interiores que incorporan PCM. a) Suelo radiante Autarkis-Uniwarm/Riho; b) Panel refrescante Ecophit (Grupo SGL); c) panel refrescante Ilkatherm (Ilkazell); d) Sistema de techo activo EmcoCool Smart Cooling.

Producto	Fabricante	Descripción	Incorporación PCM	Características TES	Patentes relacionadas
Unifloor PCM	Unifloor-Autarkis www.autarkis.nl/ www.unifloor.nl/ (Holanda)	Suelo radiante / refrescante con PCM compacto (4cm) y de instalación en seco	Macrocapulas (paneles 195x200x10m m) (Autarkis)	Tm=25°C (ó 27°C para recubrimiento de madera)	W02012018 254A2, 2011
UniWarm/	UniWarm/RIHO-Autarkis	Suelo radiante / refrescante con	Macrocapulas (Autarkis)	-	W02012018 254A2, 2011

RIHO Crystal Climate Floor (fig. 1.7a)	www.autarkis.nl/ www.uniwarm.nl (Holanda)	PCM compacto (36mm) y de instalación en seco			
Suelo radiante Rubitherm	Rubitherm www.rubitherm.de (Alemania)	Sistema compacto de suelo radiante eléctrico de instalación en seco	PCM en material poroso. Rubitherm GR42	$T_m=42^{\circ}\text{C}$	-
Suelo radiante	Phase Change Energy Solutions www.phasechange.com (EEUU)	Sistema tradicional de suelo radiante con PCM bajo los tubos	Macrocapsulas (BioPCMat)	-	-
Ilkatherm+ Smartboard (fig. 1.7c)	Ilkazell www.ilkazell.de (Alemania)	Panel modular de techo o pared activado mediante una red de tubos capilares	Compuesto de yeso y PCM microenc. (Micronal PCM, BASF)	$T_m=23 \text{ ó } 26^{\circ}\text{C}$ $\Delta h \approx 300 \text{ kJ/m}^2$	EP2039844A 3, 2008
EmcoCool Smart Cooling (fig. 1.7d)	Emco www.emco-klima.com/ (Alemania)	Panel de techo activo	Compuesto de yeso y PCM microenc. (Micronal PCM, BASF)	$T_m=23 \text{ ó } 26^{\circ}\text{C}$ $\Delta h \approx 200 \text{ kJ/m}^2$	
Ecophit Cooling Panel (PCM) (fig. 1.7b)	Grupo SGL www.ecophit.com/ (Alemania)	Panel de techo activo	PCM en matriz de grafito expandido (Ecophit LC, SGL)	$T_m=18\text{-}20^{\circ}\text{C}$	DE10200905 5441A1, 2011

Tabla 1. 7. Relación de elementos de construcción termoactivos con PCM actualmente comercializados o propuestos por los fabricantes.

1.5. Determinación de propiedades y análisis de características de los materiales

En esta sección se recogen los aspectos relacionados con las metodologías para la determinación de propiedades y el análisis de características que, de forma particular, presentan ciertas dificultades al ser aplicados sobre materiales compuestos de construcción con PCM o bien están realacionadas con cuestiones críticas que atañena a la viabilidad técnica de los mismos. Desde el punto de vista de la determinación de propiedades, la recopilación y análisis de información se centra en los métodos disponibles que permiten la medida de la curva entalpía-temperatura.

En este sentido, la determinación del resto de propiedades térmicas que se requieren para los análisis teóricos -conductividad y densidad-, no resulta tan problemática en estos compuestos. En el caso de la conductividad térmica, los investigadores han utilizado métodos estacionarios basados en la geometría de placas paralelas: placa caliente guardada (Pomianowski et al. 2011), medidor de flujo de calor (Vaz Sá et al. 2012) o en instalaciones experimentales propias (Joulin et al. 2014, Lecompte et al. 2015). Por otra parte, existen ejemplos en los que se utilizan métodos transitorios: fuente plana (Sakulich y Bentz 2012, Eddhahak-Ouni et al. 2014), fuente plana modificada (Kim et al. 2014) e hilo caliente (Mandilaras y Founti 2009, Hunher et al. 2009). Estos métodos tienen la ventaja, en

comparación con el procedimiento de placa caliente guardada, de poder aplicarse a muestras de menor tamaño. Sin embargo, no pueden utilizarse en el entorno del cambio de fase, ya que durante este proceso el comportamiento del material no es lineal (Hunger et al. 2009).

Por otro lado, la densidad aparente de estos materiales se determina habitualmente bien a través de la medida de las dimensiones y el peso de la muestra o bien mediante el método descrito en las normas EN 1015-10 (2000) y EN 12390-7 (2009), en el que se emplea una balanza hidrostática (*vid.* Capítulo 4, sección 4.3).

En lo que concierne al análisis de características, la atención del apartado 1.5.2 se centra en los trabajos de investigación que hasta el momento se han ocupado del análisis del comportamiento frente al fuego de materiales de construcción compuestos con PCM. Los investigadores coinciden en que es una cuestión relevante en la incorporación de estas sustancias orgánicas a los componentes de los edificios y que debe ser estudiada con mayor profundidad (Memon 2014, Pons et al. 2014, Ling y Poon 2013). Pese a que para este análisis se pueden aplicar los métodos convencionales de ensayo, se ha considerado conveniente recopilar la información relacionada con esta característica de los materiales, dado que, puede constituir un aspecto crítico que condicione la viabilidad técnica de los nuevos elementos de construcción propuestos.

1.5.1. Determinación de la curva entalpía-temperatura

La principal dificultad específica que presentan los materiales de construcción para la determinación de la curva entalpía-temperatura, está vinculada a la representatividad de las muestras que se analizan. De esta forma, su grado de heterogeneidad en relación al tamaño de dichas muestras, condiciona la selección de la metodología experimental más adecuada. Dentro de este ámbito, existe un acuerdo generalizado en excluir el método DSC (*Differential Scanning Calorimetry*) debido a la pequeña masa de material que se analiza (Hunger et al. 2009, Kosny et al. 2012, Cheng et al. 2013).

Por otro lado, el método T-history (Zhang et al. 1999), en el que se analizan muestras de mayor tamaño, puede ser utilizado, con ciertas precauciones, para algunos materiales. La dimensión de las mencionadas muestras debe asegurar, por una parte, la uniformidad de la temperatura en su interior durante los experimentos y, por otra parte, la representatividad del material heterogéneo que se pretende analizar.

Por último, varios grupos de investigación han intensificado en el desarrollo o adaptación de metodologías de ensayo que permitan este análisis térmico de muestras de mayor tamaño. La información sobre estos métodos, que constituyen una prometedora línea de trabajo dentro de la aplicación de los PCM en la construcción, se recoge en los apartados 1.5.1.2 y 1.5.1.3.

1.5.1.1. T-history

El método T-history está basado en la comparación de la evolución temporal de la temperatura que experimentan dos sustancias –la que se pretende caracterizar y otra de

capacidad térmica conocida que se utiliza como referencia-, contenidas en sendos recipientes de geometría cilíndrica, al ser sometidas a un cambio brusco en la temperatura de su entorno, con el que intercambian calor mediante convección y radiación. El dispositivo experimental, representado esquemáticamente en la figura 1.8, precisa de una cámara cerrada cuya temperatura interior se mide y está, preferiblemente, controlada. En ella, se alojan las muestras, en las cuales se colocan -bien en el centro o sobre la superficie- las sondas de temperatura. La evolución térmica, tanto de las muestras como del interior de la cámara, se registra por medio de un sistema de adquisición de datos.

El método está basado en las siguientes hipótesis:

- se considera una temperatura uniforme en toda la muestra
- el coeficiente equivalente de transferencia de calor entre la muestra y el ambiente que la rodea es idéntico para una diferencia dada entre ambas temperaturas ($T_{\infty}-T$).

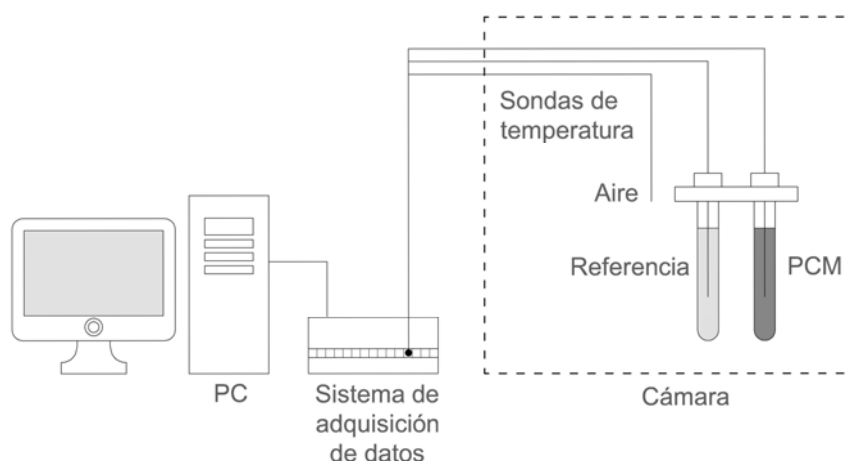


Fig. 1. 8. Representación esquemática del dispositivo experimental utilizado en el método *T-history*.

Si se asumen estas simplificaciones, es posible plantear, a partir de las temperaturas registradas, el balance de energía para la sustancia analizada y la referencia asociado a un determinado salto térmico ($T_{i+1}-T_i$, Ec. 1 y 2). De esta manera, si se conocen las propiedades de la sustancia de referencia, es posible calcular el coeficiente de transferencia de calor medio sobre su superficie asociado a dicho salto térmico (Ec. 1), el cual, cuando es introducido en la ecuación correspondiente a la sustancia medida (Ec. 2), permite la estimación de la variación de la energía térmica que experimenta dicho material. A partir de esta idea fundamental, Marín et al. (2003) propuso la modificación, en relación con el primer trabajo de Zhang et al. (1999) en el que se introducía el método, que hacía posible la obtención de la curva entalpía temperatura a partir de una integración numérica de los datos empíricos ($\Delta h_{PCM}(T_i)$, Ec. 3). En la figura 1.9 se muestra una representación gráfica de este algoritmo de integración.

$$(m_{ref} \cdot c_{p,ref} + m_t \cdot c_{p,t}) \cdot (T_{i+1} - T_i) = \bar{h}_{c-r} \cdot A_t \cdot \int_{t_i}^{t_{i+1}} (T_{\infty} - T_i) \cdot dt$$

$$= \bar{h}_{c-r} \cdot A_t \cdot I_i$$
Ec. 1

$$m_{PCM} \cdot \Delta h_{PCM} + m_t \cdot c_{p,t} \cdot (T_{i+1} - T_i) = \bar{h}_{c-r} \cdot A_t \cdot \int_{t'_i}^{t'_{i+1}} (T_{\infty} - T_i) \cdot dt$$

$$= \bar{h}_{c-r} \cdot A_t \cdot I'_i$$
Ec. 2

$$\Delta h_{PCM}(T_i) = \left(\frac{m_{ref} \cdot c_{p,ref} + m_t \cdot c_{p,t}}{m_{PCM}} \cdot \frac{I'_i}{I_i} - \frac{m_t}{m_{PCM}} \cdot c_{p,t} \right) \cdot \Delta T_i$$
Ec. 3

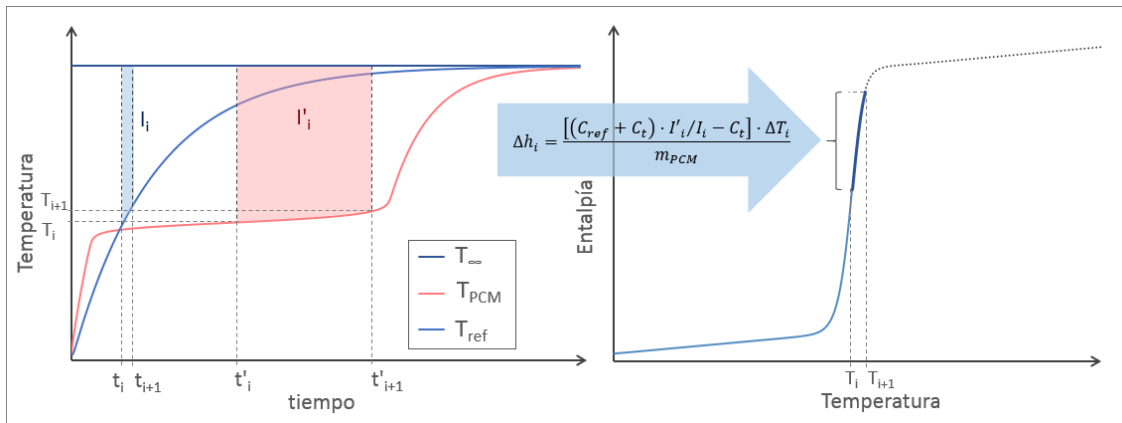


Fig. 1. 9. Representación gráfica del algoritmo de integración numérica propuesto por Marín et al. (2003) para el cálculo de la curva entalpía-temperatura.

Dadas las características particulares de esta metodología (sencillez, mayor tamaño de muestra, posibilidad de estudiar el subenfriamiento, etc.), su uso se ha popularizado en los últimos años. Se ha extendido, de hecho, a más casos de aplicación como la caracterización de compuestos granulados (Rady et al. 2009) o los dedicados a la determinación de la línea de equilibrio de sustancias bifásicas de Desgrosseilliers et al. (2013) y Schmit et al. (2015). Sin embargo, debido a que no todavía existe ningún equipo comercial, es necesario un análisis de la exactitud de las medidas obtenidas en cada equipo que se desarrolla. En este sentido, Lazaro et al. (2006) propusieron una metodología para la verificación de estas instalaciones basada en la calibración de las sondas de temperatura y en la comparación de los resultados con las propiedades de sustancias conocidas en términos de temperatura de cambio de fase y de variación de entalpía.

Frecuentemente, los investigadores han efectuado la verificación de su instalación T-history particular a través de la comparación con las propiedades de distintas sustancias de referencia (p. ej. Lázaro et al. 2006, Rathgeber et al. 2014) o con las medidas de otros equipos (principalmente DSC) (p.ej. Hong et al. 2004, Rady y Arquís 2010). A partir de este contraste se establecen unos niveles de exactitud que para la determinación de la entalpía de cambio de fase se sitúan entre el 5% (p.ej. Hong et al. 2004) y el 10% (p. ej. Lázaro et al.

2006). Asimismo, Kravvaritis et al. (2010) analizaron la reproducibilidad de los ensayos T-history mediante la repetición de 50 medidas para una misma sustancia. De esta muestra estadística obtuvieron una desviación típica asociada al cálculo del incremento de entalpía de aproximadamente un 4% (lo cual supone intervalo de incertidumbre de un $\pm 8\%$).

Sin embargo, no es tan habitual el estudio aislado de los efectos de los distintos fenómenos que pueden introducir desviaciones en las medidas del método. Zhang et al. (1999) y Rady et al. (2009), presentaron fórmulas, distintas entre sí -pues se aplicaron a diferentes métodos de integración-, para la estimación de la propagación de los errores en la medida de temperatura de las sondas a través del método. Por su parte, Lazaro (2008) mostró cómo la posición de las probetas -horizontal o vertical- influye en las medidas, y llegó a determinar que, si se colocan horizontalmente, se minimiza el efecto del movimiento de la fase sólida y del gradiente de temperaturas longitudinal.

La principal restricción del método T-history se impone a partir de la necesidad de asegurar un cierto grado de uniformidad en la temperatura de la muestra. Hasta el momento, se ha utilizado para este propósito la condición clásica para los sistemas de capacidad que se impone al número de Biot asociado a la muestra ($Bi < 0,1$) (Incropera et al. 2007). Esta restricción surge a partir del estudio de la transferencia de calor transitoria en cuerpos cuya inercia térmica se debe únicamente a la variación de energía sensible. Existe, no obstante, en los trabajos publicados sobre esta metodología, una discrepancia en la definición de este número adimensional, relacionada con la selección de la longitud característica de la muestra. Algunos autores han tomado para su definición el cociente entre el volumen y el área expuesta ($Bi = h \cdot R / (2 \cdot \lambda)$) (p. ej. Zhang et al. 1999 y Rady et al. 2009) mientras que otros (p. ej. Hong et al. 2004 y Sandnes y Rekstad 2006) han elegido la correspondiente a la distancia asociada al mayor gradiente de temperaturas en la muestra ($Bi = h \cdot R / \lambda$). Aunque ambas definiciones se reconocen dentro del ámbito de la transferencia de calor (Incropera et al. 2007), su grado de exigencia cuando se aplican a la principal restricción del método es considerablemente distinto.

Sin embargo, aparte de esta consideración, existen evidencias experimentales, como las presentadas por Hong et al. (2004), de que el gradiente térmico en la dirección radial se acentúa durante el proceso de cambio de fase. En la siguiente figura (fig. 1.10) se muestra la evolución de la temperatura de distintos puntos de una muestra T-history que obtuvieron durante el proceso de solidificación. En consecuencia, los autores afirmaron que la condición utilizada hasta aquel momento para el número de Biot no es suficiente para garantizar la uniformidad de la temperatura en la muestra y destacaron el interés de realizar un análisis de este fenómeno.

Se considera, por tanto, que el análisis detallado de los principales fenómenos que son susceptibles de introducir desviaciones sobre la medida de la curva entalpía-temperatura, puede ser útil en el futuro desarrollo y mejora de la exactitud del método T-history.

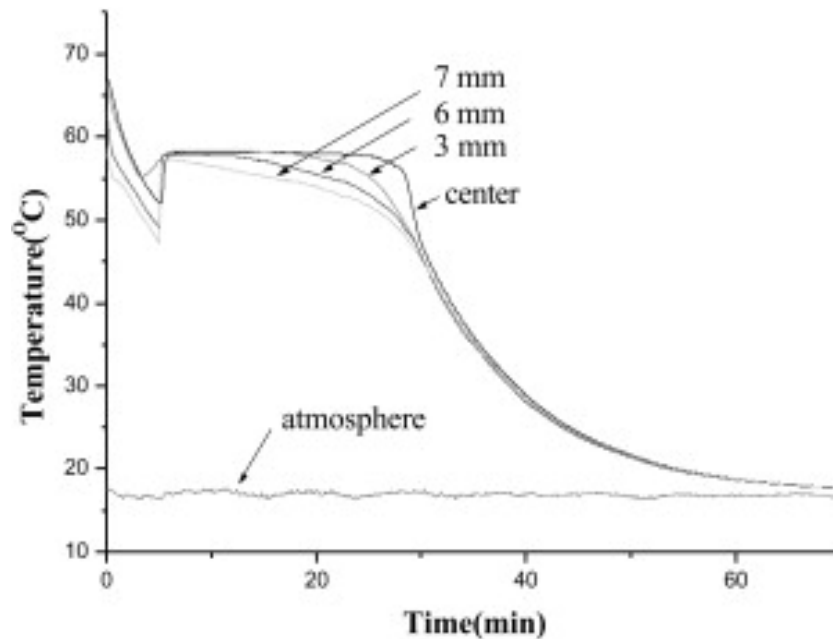


Fig. 1. 10. Evolución de la temperatura de diferentes puntos de una muestra de acetato de sodio ($R=16\text{mm}$) (Hong et al. 2004).

1.5.1.2. Dispositivos experimentales basados en el método de placa caliente

En los últimos años se ha incrementado el interés de los investigadores por este tipo de métodos para la caracterización de las propiedades termofísicas de materiales y elementos de construcción que incorporan PCM. De este modo, se ha encontrado un número significativo de trabajos en los que se describe la experimentación con estos dispositivos, cuya información principal se recoge en la tabla 1.8.

De una forma general, los dispositivos experimentales utilizados parten de la disposición habitual de los métodos de placa caliente o placa caliente guardada. Sobre esta configuración, se aplican ciertos cambios al control de la temperatura de las placas que permiten la realización de los ensayos de respuesta transitoria mediante los que se obtiene la medida de las propiedades termofísicas relacionadas con el almacenamiento térmico.

Estos métodos presentan la principal ventaja de analizar muestras de un tamaño representativo, así como de permitir, en la mayoría de los casos, la caracterización completa (λ y curva entalpía-temperatura) del material. Algunos investigadores (p.ej. Hunger et al. 2009, Mandilaras et al. 2015), incluso, emplean estos dispositivos experimentales para ensayar el comportamiento dinámico de los materiales al ser sometidos a excitaciones térmicas que simulan las condiciones reales de operación de un cerramiento.

Sin embargo, las dimensiones de las muestras acarrearán la presencia, durante los ensayos dinámicos, de ciertos gradientes térmicos que dificultan la determinación de la curva entalpía-temperatura. Ante esta dificultad, dos son las soluciones propuestas para reducción de la desviación asociada a la falta de uniformidad en la temperatura de la muestra. Por un lado, Kosny et al. (2012) y Schukla et al. (2012) propusieron la realización de los experimentos mediante la aplicación de sucesivos incrementos -o decrementos- de la temperatura (en torno a $1,5 \pm 0,5^\circ\text{C}$) de ambas placas, de tal manera que la medida del flujo

de calor de los sensores durante cada escalón pudiera ser ligada a la variación de entalpía del material asociada a dicho salto térmico. Este procedimiento experimental se ha plasmado en la reciente elaboración de la norma ASTM C1784-14 (2014). El método, sin embargo, presenta la desventaja de requerir el establecimiento de una condición de equilibrio térmico al final de cada una de las etapas de análisis, lo cual implica la utilización largos periodos de estabilización -superiores a 2 horas según prescribe la misma norma (ASTM C1784-14)-.

Por otro lado, algunos investigadores han empleado métodos inversos para la determinación de la curva temperatura (Cheng et al. 2013, Pomianowski et al. 2014 y Mandilaras et al. 2015). En éstos, la medida de las propiedades del material se realiza por medio del ajuste del modelo matemático -establecido *a priori*- que representa al conjunto físico que comprende la muestra, los sensores y el equipo experimental, a los datos empíricos obtenidos. Este análisis numérico permite, en relación al método anterior, la simplificación del procedimiento experimental y la reducción de los tiempos de ensayo. Los modelos utilizados en estos métodos inversos presentan características generales similares y muestran, habitualmente, un buen ajuste a los resultados empíricos (especialmente en los trabajos de Cheng et al. 2013 y Franquet et al. 2014). Sin embargo, las magnitudes medidas de forma directa en el equipo y el procedimiento experimental utilizado son diferentes en los trabajos consultados. Desde este punto de vista, la sensibilidad de las propiedades termofísicas que se desea determinar frente a las condiciones de los experimentos (exactitud de los sensores, magnitudes medidas y procedimiento de ensayo) es un aspecto sobre el que se debe seguir investigando. Sólo en el trabajo de Cheng et al. (2013) se presenta un estudio de propagación de incertidumbre aplicado a esta metodología de tratamiento de los datos empíricos. A raíz de los resultados obtenidos ($\delta c_{p,ef}(T)/c_{p,ef}(T) \approx \pm 20\%$), señalaron la necesidad de desarrollar mejoras en la exactitud de las medidas.

De una forma general, el procedimiento experimental basado en la geometría de placas resulta muy prometedor para el análisis y determinación de propiedades de materiales y elementos de construcción con PCM. No obstante, es preciso señalar que existen algunas cuestiones que requieren un mayor desarrollo. Por un lado, la norma ASTM C1784-14 (2014) señala la necesidad de llevar a cabo una campaña de ensayos de intercomparación que permitan establecer un nivel de exactitud a las medidas. Asimismo, no es frecuente que en los trabajos publicados hasta el momento se haga referencia a este importante atributo. En segundo lugar, la investigación sobre los procedimientos de ensayo más adecuados podría ser útil en la unificación de los mismos. Finalmente, la incorporación, por parte de los fabricantes, de las modificaciones necesarias en los equipos comerciales de placa caliente, contribuiría a la generalización del empleo de esta metodología de medida.

Trabajo	Materiales	Medidas	Equipo / Magnitudes medidas de forma directa	Procedimiento de medida	Exactitud / Análisis de la incertidumbre de la medida
Mandilaras y Founti (2009),	Marmol + PCM microenc.	$c_{p,ef}(T)$	-Prototipo de laboratorio	Excitación en las placas:	No se presenta incertidumbre

Hunger et al. (2009)	(Mandilaras y Founti, 2008) Hormigón + PCM microenc. (Hunger et al. 2009) Tamaño de muestra: 200x200x30mm		Magnitudes medidas: -flujo de calor -T ambas caras	-Función escalón ($c_{p,ef}$) -Función senoidal (operación en condiciones reales) Obtención de la medida: -Método directo	asociada a las medidas
Kosny et al. (2012) Shukla et al. (2012) ASTM C1784-14 (2014)	-yeso+PCM (Shukla et al. 2012) -aislante+PCM (Kosny et al. 2012) Tamaño de muestra: 300x300mm	Curva h-T, λ	-HFM ⁶ comercial Magnitudes medidas: -flujo de calor ambas caras -T ambas caras	Excitación en las placas: -Sucesivos escalones ($1,5 \pm 0,5^\circ\text{C}$) Obtención de la medida: -Método directo	Sin evaluar, pendientes de realización de la intercomparación (ASTM C1784-14)
Cheng et al. (2013) Pomianowski et al. (2014)	Hormigón + 4-6% PCM microenc. Tamaño de muestra: 500x500mm	$c_{p,ef}(T)$, λ	-GHP ⁷ comercial Magnitudes medidas: -medida de flujo de calor en una cara -medida de T en diez puntos	Excitación en las placas: -Incremento a ritmo constante de temperaturas Obtención de la medida: -Método inverso	Propagación de incertidumbres: - λ : 1.8% - $c_{p,ef}$: hasta 20% (Chent et al. 2013)
Konstantinidou et al. (2014)	-aislante (20mm)+yeso (12,5mm) con PCM	Curva h-T	-HFM comercial Magnitudes medidas: -Medida del flujo de calor y de la temperatura en ambos extremos	Excitación en las placas: -Función escalón Obtención de la medida: -Método directo	Intercomparación con T-history; $e_{\Delta h} = 17\%$, señalan que es necesario seguir trabajando en la exactitud
Joulin et al. (2014) Franquet et al. (2014)	Mortero + 25% PCM microenc. Tamaño de muestra: 250x250x40mm	c_p , h_m , λ	-Prototipo de laboratorio Magnitudes medidas: -Flujo de calor ambas caras -T ambas caras	Excitación en las placas: -Rampa de temperatura (h_m) -Incrementos de temperaturas fuera del cambio de fase (c_p) Obtención de la medida: -Método directo	$\lambda = \pm 3\%$ $c_p = \pm 5\%$ $h_m = \pm 10\%$
Karkri et al. (2015) Lachheb et al. 2014	Yeso+PCM Tamaño de muestra: 42x42x10mm	c_p , h_m , λ y α	-Prototipo de laboratorio Magnitudes medidas: -Flujo de calor y temperatura	Excitación en las placas: -Función senoidal en ambas caras λ y difusividad -Función exponencial de primer orden c_p y h_m	No se presenta incertidumbre asociada a las medidas

⁶ HFM: Equipo de medida de flujo de calor (*Heat Flow Meter*)

⁷ GHP: Equipo de placa caliente guardada (*Guarded Hot Plate*)

			en ambas caras	Obtención de la medida: -Método directo: λ , α -Método directo: c_p , h_m	
Mandilaras et al. (2015)	-aislante (30mm)+ 5mm de SSPCM Tamaño de muestra: 200x200mm	$c_{p,ef}(T)$	-Prototipo de laboratorio HFM Magnitudes medidas: -Sensores de flujo de calor y de temperatura en ambas superficies	Excitación en las placas: -Temperatura "exterior" senoidal, fija la "interior" Obtención de la medida -Método inverso	No se evalúa

Tabla 1. 8. Resumen de los trabajos en los que se emplea un dispositivo de placa caliente para la determinación de las propiedades ligadas al almacenamiento térmico.

1.5.1.3. Otros dispositivos

Palomo del Barrio y Dauvergne (2011) desarrollaron un interesante método para la caracterización térmica completa -es decir, determinación de la conductividad térmica, el calor específico y la curva entalpía temperatura- de materiales sólidos compuestos con PCM. Éste se basa en el análisis de la respuesta de una muestra cilíndrica del material (en su ejemplo de dimensiones 76x200mm, fig. 1.11) a partir de un método inverso. Dicha probeta se introduce en una cámara con un ambiente controlado y se somete a una cierta variación de temperatura (en su caso, un incremento constante en el tiempo hasta llegar a un determinado valor en el que se estabiliza). Las temperaturas medidas en el centro y la superficie de la muestra, así como la del aire interior de la cámara se registran durante el ensayo completo.

Los autores llevaron a cabo un riguroso trabajo relacionado con el análisis de las condiciones de los ensayos que proporcionan una mayor exactitud en la determinación de la curva entalpía-temperatura, teniendo en cuenta el ruido en la medida de las sondas. Asimismo, analizaron la influencia de la colocación de estos sensores en los resultados. Finalmente, los valores medidos de las propiedades termofísicas se compararon con los obtenidos a través de métodos convencionales (DSC y placa caliente guardada) para un compuesto de grafito y sal. En el caso del DSC, se utilizaron los valores promedio de cuatro muestras, posiblemente para evitar los errores relacionados con la heterogeneidad del material. Las medidas obtenidas mediante esta nueva metodología se aproximaban en al menos un 4% a las de los métodos convencionales. Como trabajo futuro, los autores señalaron la necesidad de proporcionar el intervalo de incertidumbre asociado a las medidas.

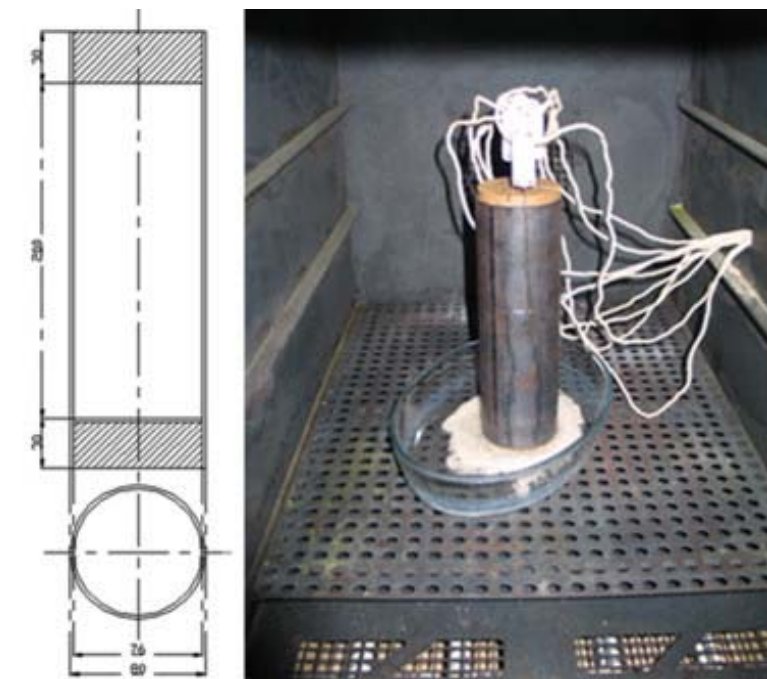


Fig. 1. 11. Croquis e imagen del dispositivo experimental propuesto por Palomo y Dauvergne (2011) para la caracterización de materiales sólidos compuestos con PCM.

1.5.1.4. Discusión

De forma general, las principales dificultades en la determinación de la curva entalpía-temperatura de materiales compuestos con PCM están relacionadas, por una parte, con su comportamiento no lineal y, por otra parte, con la falta de uniformidad de la temperatura en las muestras. Aunque algunos procedimientos experimentales son muy prometedores, todavía no se dispone de un método estandarizado y consolidado para la determinación de la curva entalpía-temperatura. De hecho, la única norma desarrollada hasta el momento (ASTM C1784-14) admite estar en fase de revisión y señala la necesidad de realizar ensayos comparativos entre distintos equipos a fin de analizar la exactitud del método.

Este proceso de verificación es más complejo en los dispositivos experimentales que permiten el análisis de muestras de mayor tamaño. Así como en el método T-history se puede utilizar para este propósito el ensayo de sustancias conocidas (p. ej. Lázaro et al. 2006) o la comparación con equipos de medida alternativos (p. ej. DSC, Rady y Arquís 2010), en estos dispositivos es necesario recurrir, a causa de la escasez o inexistencia de materiales de referencia o de métodos alternativos, a la calibración y análisis de la exactitud de las medidas de los sensores, la intercomparación de equipos de medida similares (según aconseja la norma ASTM C1784-14) o al análisis de propagación de incertidumbres a través del método experimental (Cheng et al. 2013).

Las desviaciones observadas o calculadas por los investigadores son todavía apreciables; por ejemplo varían entre el 5% (p. ej. Palomo del Barrio y Dauvergne 2011) o

el 10% (p. j. Joulin et al. 2014) en la determinación de la entalpía asociada al cambio de fase. Aunque los investigadores señalan el interés de trabajar en la mejora de la calidad de las medidas (Cheng et al. 2013), de forma paralela resulta conveniente, tener en consideración estas posibles desviaciones cuando se utilizan los valores medidos como datos de entrada para los cálculos teóricos.

1.5.2. Análisis de características de los materiales de construcción compuestos con PCM

1.5.2.1. Análisis del comportamiento frente al fuego

Pese a que los PCM de naturaleza orgánica como las parafinas presentan la ventaja, en relación a los materiales inorgánicos, de no experimentar fenómenos de subenfriamiento o histéresis significativos y de evitar habitualmente los problemas relacionados con la compatibilidad química con los materiales de construcción, su principal inconveniente está relacionado con su inflamabilidad (Cabeza et al. 2011). De esta manera, la presencia de PCM orgánico en compuestos con materiales de construcción no inflamables, tales como el hormigón o el yeso, provoca el deterioro del comportamiento ante el fuego de dichos sustratos. Sin embargo, esta característica del material no ha sido frecuentemente estudiada en los numerosos trabajos publicados hasta el momento acerca de la preparación y determinación de propiedades de este tipo de compuestos. En algunos trabajos recientes sobre la revisión del estado del arte en las aplicaciones generales de los PCM en la construcción, se recuerda la necesidad de obtener, antes de su incorporación en los edificios, por un lado, las clasificaciones pertinentes de los materiales en relación a su comportamiento ante el fuego, y, por otro lado, de asegurar el cumplimiento de las exigencias relacionadas con la seguridad en caso de incendios (Pomianowski et al. 2011, Kalnaes et al. 2015). Además, Pomianowski et al. (2011) considera el estudio de la influencia del contenido de PCM en los compuestos con materiales de construcción como un factor de diseño potencialmente crítico que debe ser tenido en cuenta en futuros trabajos.

En el contexto de su investigación sobre distintos métodos para la incorporación de PCM en compuestos de hormigón, Hawes (1991) realizó un análisis preliminar a escala de laboratorio del comportamiento frente a la combustión sobre la superficie de estas muestras (cuyo dispositivo experimental estaba basado en la norma ASTM D 3806). Observó una buena resistencia al fuego, una mínima propagación de la llama y la emisión de humos detectada visualmente fue muy leve. Asimismo, Salyer y Sircar (1990) llevaron a cabo el ensayo de comportamiento a la combustión (definido por la norma ASTM E84) de la superficie de distintas composiciones de placas de yeso con PCM impregnado a las que se añadía un retardante de llama. Obtuvieron resultados satisfactorios, si bien la formulación de las muestras que contenían un 30% de PCM necesitaba ser optimizada de tal manera que éstas pudieran ser calificadas como auto-extinguibles. Por su parte, Banu et al. (1998) realizaron ensayos de reacción al fuego sobre un compuesto de panel de yeso similar con un contenido del 25% de PCM. Analizaron por un lado, según la norma CAN/ULC-S 102 el comportamiento al fuego de la superficie: propagación de la llama y humos liberados. Por otro lado, evaluaron la inflamabilidad en un calorímetro de cono (según la norma ASTM E 1354). Obtuvieron valores de propagación de llama superiores a los límites fijados por la

normativa canadiense. En consecuencia, señalaron la posibilidad de añadir retardantes de llama con el objetivo de mejorar este comportamiento.

Más recientemente, Fernández Lladó (2012) llevó a cabo un análisis del comportamiento frente al fuego de dos tipos de compuestos: por una parte, de yeso y PCM, utilizando el microencapsulado Micronal (BASF) o el granulado GR42 de Rubitherm, y, por otra parte, de mortero con GR42. A partir de los ensayos realizados, concluyó que las muestras de yeso con el material granulado poseen mejores prestaciones frente al fuego que con el microencapsulado, para un contenido de parafina equivalente. Asimismo, cuantificó los porcentajes máxicos de las microcápsulas o los gránulos en el yeso, a partir de las cuales es recomendable la adición de retardantes de llama, en un 25% y un 50% respectivamente. Por otro lado, no observó una alteración crítica de la reacción al fuego de los morteros con un 7% de granulado. Por su parte, Asimakopoulou et al. (2015) estudiaron algunos aspectos del comportamiento al fuego, a través de la termogravimetría y el calorímetro de cono, de compuestos de yeso con PCM microencapsulado. Mediante microscopía electrónica de barrido demostraron cómo las altas temperaturas producen la rotura completa de las cápsulas embebidas en el compuesto. Asimismo, obtuvieron un modelo de fluidodinámica computacional que permitió la predicción de los resultados observados en el calorímetro de cono.

Por otro lado, existe un mayor número de trabajos dedicados a reducción de la inflamabilidad de los SSPCM por medio de la adición de retardantes de llama (Cai et al. 2007, 2008 y 2008b, Zhang et al. 2010, Sittisart y Farid 2011). En ellos se utiliza la termogravimetría y el calorímetro de cono. Los resultados de estos estudios muestran la capacidad de los aditivos para reducir la inflamabilidad, a través de la medida realizada de la tasa máxima de calor liberado (PHRR⁸), y su efecto poco significativo sobre la capacidad de almacenamiento del compuesto. Nguyen et al. (2012) reunieron esta información en su revisión sobre la adición de retardantes de llama a estos materiales compuestos.

A partir de la revisión de los trabajos dedicados al análisis de la respuesta al fuego de los materiales de construcción que incorporan PCM, es posible extraer las siguientes observaciones generales:

- Los estudios publicados hasta el momento se han ocupado principalmente del análisis del comportamiento al fuego de los materiales en ensayos realizados a escala de laboratorio (p. ej. Hawes 1991, Fernández Lladó 2012, Asimakopoulou et al. 2015) más que en la obtención de su clasificación a partir de la aplicación de los experimentos normalizados pertinentes. La explicación de este hecho reside en que los trabajos publicados se centran en la etapa de desarrollo y análisis de las propiedades del producto.
- La presencia de PCM orgánico perjudica el comportamiento de los compuestos que utilizan sustratos como el yeso o el hormigón. Cuando el material es sometido a altas temperaturas, los vapores inflamables desprendidos por las sustancias orgánicas alcanzan la superficie expuesta al incendio contribuyendo a su crecimiento (Asimakopoulou et al. 2015). Este fenómeno depende en gran

⁸ Del inglés *Peak Heat Release Rate*

medida de su contenido en material orgánico (Fernández Lladó 2012), de modo que es importante la optimización de su composición considerando este aspecto.

- La utilización de microcápsulas para retener el PCM parece no tener un efecto favorable. Asimakopoulou et al. (2015) demostraron su deterioro completo al ser sometido el compuesto a altas temperaturas. Asimismo, Fernández Lladó (2012) obtuvo una mejor respuesta al fuego de los compuestos con matriz de yeso que utilizaban PCM retenido en gránulos de material mineral poroso en comparación con los que incorporaban microcápsulas.
- Varios autores (Salyer y Sircar (1990), Fernández Lladó 2012) han mostrado la eficacia de retardantes de llama en la mejora del comportamiento de los materiales. La formulación de compuestos que, manteniendo las propiedades térmicas relativas al almacenamiento, satisfagan los requerimientos exigidos para su aplicación en los edificios, es una de las líneas de trabajo futuro más importantes que los investigadores coinciden en señalar.

1.6. Simulación del comportamiento térmico de los PCM integrados en elementos de construcción

Los modelos de simulación de elementos de construcción con PCM -activos y pasivos- constituyen una herramienta fundamental en el análisis de su comportamiento térmico. El desarrollo de este tipo herramientas de cálculo permite el diseño y optimización de estos sistemas así como el estudio de su viabilidad técnica y económica. Además, en el caso de los elementos activos, la síntesis de modelos que permitan una predicción fiable de su respuesta dinámica es un aspecto importante en el desarrollo e implementación de los métodos de control (Sourbron et al. 2014).

De forma general, estos elementos de construcción -activos y pasivos- con una inercia térmica mejorada, interaccionan directamente con el resto de componentes edificio, pudiendo llegar a alterar de manera notable su dinámica global. Debido a esta razón, cuando se lleva a cabo la evaluación teórica del comportamiento de estos componentes con PCM, es recomendable realizar la simulación numérica integrada dentro de modelos de simulación energética de edificios.

En esta sección se realiza una revisión de los modelos actualmente disponibles para el estudio numérico del comportamiento de elementos de construcción con PCM dentro de los principales programas de simulación de edificios reconocidos dentro de este ámbito de investigación. Se ha dividido en dos apartados -1.6.2 y 1.6.3- la información relativa a los modelos numéricos de elementos activos y pasivos, respectivamente. Pese a que el estudio de las aplicaciones pasivas no es el objetivo principal de la tesis, se ha estimado adecuado hacer referencia a las principales herramientas de cálculo relacionadas. Entre el trabajo vinculado a la elaboración de ambos tipos de modelos, existen numerosas similitudes, no sólo desde el punto de vista teórico (p. ej. análisis de transferencia de calor en elementos con PCM), sino metodológico (relacionado con la validación de modelos), que hacen que resulte conveniente no perder la referencia de las herramientas de simulación de cerramientos pasivos -que se encuentran en una etapa de desarrollo más avanzada- cuando se aborda el estudio numérico de componentes termoactivos.

1.6.1. Métodos matemáticos para el análisis de la transferencia de calor en los elementos de construcción

En esta sección se describen los métodos matemáticos que emplean habitualmente emplean los programas de simulación energética de edificios para el cálculo de la transferencia a través de los elementos de construcción. El primer apartado (1.6.1.1) se dedica a la descripción breve de los métodos más generalizados en el estudio de la transferencia de calor en cerramientos pasivos, mientras que en el segundo (1.6.1.2) se analizan con mayor detalle los algoritmos específicos, o modificaciones aplicadas a los métodos generales, que permiten la simulación de elementos de construcción termoactivos.

1.6.1.1. Métodos matemáticos para la simulación de elementos pasivos

Estos algoritmos permiten la simulación de la conducción del calor, generalmente unidimensional, a través de los componentes del edificio y están basados en el método de las funciones de transferencia o en la implementación de un esquema numérico de diferencias finitas (Crawley et al. 2005).

1.6.1.1a. Funciones de transferencia

Los algoritmos basados en el método de las funciones de transferencia permiten calcular de una manera precisa la transferencia de por conducción calor a través de los cerramientos exigiendo un esfuerzo computacional muy bajo. Sin embargo la aplicación de este eficiente método queda restringido a sistemas físicos lineales e invariantes en el tiempo tales como los constituidos por los elementos de construcción compuestos con materiales convencionales cuyas propiedades termofísicas se pueden asumir constantes.

Las características de estos sistemas permiten su caracterización a través de su respuesta frente a determinadas funciones básicas de las variables de entrada. De esta manera, el comportamiento dinámico del elemento se puede calcular a través de la composición de las respuestas que provocarían las distintas variables de entrada tratadas de forma independiente. El principal inconveniente de estos algoritmos para su aplicación al cálculo de la transferencia de calor en elementos con PCM, reside en que no contemplan la variación de las propiedades termofísicas con la temperatura.

1.6.1.1b. Diferencias finitas

La simulación de la transferencia de calor mediante un esquema de diferencias finitas, aunque implica un mayor esfuerzo computacional, permite considerar la variación de las propiedades con la temperatura. Los programas de simulación energética de edificios exigen la implementación de modelos sencillos que exijan una baja carga computacional, de modo que los algoritmos desarrollados se basan frecuentemente en esquemas numéricos de malla fija para la simulación del cambio de fase. Dentro de ellos, se utilizan más habitualmente los métodos del calor específico aparente y de la entalpía (Al-Zaadi y Zhai, 2013).

1.6.1.2. Métodos matemáticos para la simulación de elementos activos

Los elementos de construcción activos (TABS, superficies interiores activadas, suelos radiantes) son sistemas físicos complejos, en los que los distintos fenómenos de la transferencia de calor -conducción tridimensional en el elemento constructivo, intercambio de calor entre éste y elemento activador (tubos de agua, circulación de aire o resistencias eléctricas)- se suelen simplificar para la integración de sus correspondientes modelos en los programas de simulación de edificios. De esta manera, el compromiso entre coste computacional y exactitud de la predicción teórica resulta una de las cuestiones determinantes en la selección de estas herramientas de cálculo.

En este apartado se introducen los modelos teóricos que se han utilizado hasta el momento para la evaluación de la transferencia de calor en estos elementos. Estos métodos de cálculo, cuya información principal se recoge en la tabla 1.9, se han analizado desde el punto de vista de su compatibilidad con la simulación de elementos activos con PCM.

1.6.1.2a. Métodos basados en esquemas multidimensionales de volúmenes finitos, diferencias finitas y elementos finitos

Estos métodos permiten la descripción detallada de la geometría del elemento. Generalmente, se suelen asumir ciertas simplificaciones y aplicar algunas condiciones de simetría que permiten reducir el dominio del problema y con él, el esfuerzo computacional su resolución acarrea. De esta forma, predomina en el cálculo de la transferencia de calor en estos elementos el uso de geometrías bidimensionales. Pese a ser el método numérico más versátil, presenta el principal inconveniente de su elevado coste computacional. De esta manera, aunque se pueden encontrar algunos ejemplos (como el de Fort 2001) de estas herramientas integradas en programas de simulación energética de edificios, generalmente se aplican a los análisis de la transferencia de calor en estos elementos de forma aislada (p. ej. Shin et al. 2015) o para la validación de modelos simplificados más eficientes desde el punto de vista computacional (p. ej. Laouadi 2004, Weber et al. 2005).

1.6.1.2b. Modelos basados en circuitos equivalentes de resistencias y capacidades térmicas (RC)

Estos métodos están basados en la idea de adaptar un esquema equivalente de resistencias y capacidades térmicas -con un reducido número de nodos-, de tal forma que la configuración resultante permita simular el comportamiento de estos elementos de construcción. Koschenz y Dorer (1999) aplicaron a un modelo unidimensional una resistencia térmica corregida con el objetivo de contemplar los efectos bidimensionales de la transferencia de calor en el seno del elemento constructivo. Esta resistencia térmica equivalente se calcula a través del factor de forma obtenido mediante la solución analítica estacionaria para una losa con tubos embebidos (*vid.* Capítulo 5, secciones 5.3.1.3 y 5.3.2.1). Esta primera aplicación del método resulta muy útil en la integración de estos modelos a los programas de simulación energética, ya que tan sólo implica la adición de un término fuente sobre el nodo y el uso de la mencionada resistencia térmica equivalente.

Además, el comportamiento lineal de los materiales tradicionales de construcción permite la simplificación del esquema numérico que representa a estos elementos de construcción. Siguiendo esta idea se han desarrollado los denominados modelos RC optimizados. Arkander (2000), Weber y Jóhannesson (2005) y Weber et al. (2005) obtuvieron esquemas RC equivalentes optimizados cuya respuesta se aproximaba con gran exactitud a la de un modelo bidimensional (elementos finitos) dentro del espectro de frecuencias relacionado con la aplicación. Además, Weber et al. (2005) realizaron la comparación con datos experimentales de estos modelos de una instalación real en un edificio de oficinas. La predicción del modelo RC sintetizado se aproximaba en al menos un 4% a las medidas experimentales.

Pese a que estos modelos son atractivos desde el punto de vista de su exactitud en relación al esfuerzo computacional, su aplicabilidad para la simulación de elementos con PCM, caracterizados por su respuesta no lineal, no ha sido hasta el momento demostrada con suficiente exhaustividad. Asimismo, el análisis tradicional basado en la respuesta en frecuencia no puede aplicarse directamente para la síntesis de circuitos equivalentes de elementos de construcción activos con PCM, debido al su mencionado comportamiento no lineal en el rango de temperaturas de cambio de fase.

1.6.1.2c. Funciones de transferencia

Entre otros factores, y dentro de este contexto, la utilización de algoritmos basados en las funciones de transferencia ha estado motivada por la necesidad de adaptar los métodos generales de cálculo de los programas de simulación a la simulación de elementos activos. En este sentido, Strand y Pedersen (2002) desarrollaron la modificación del esquema de cálculo de transferencia de calor por conducción a través de los elementos constructivos de EnergyPlus que permitía la simulación de elementos activos. De una manera análoga, dentro del entorno del programa TRNSYS, también se aprovecha el algoritmo de cálculo basado en las funciones de transferencia mediante el acoplamiento del intercambio de calor con los tubos caracterizado por el mencionado modelo de Koschenz y Lehmann (2000). Debido al comportamiento no lineal del PCM, este procedimiento no puede ser aplicado para su simulación.

1.6.1.2d. Modelos basados en soluciones analíticas

Laouadi (2004) desarrolló un modelo semianalítico en el que el modelo tradicional para el cálculo de la transferencia de calor unidimensional se complementa a través la solución analítica correspondiente a los efectos bidimensionales de la transferencia de calor. Esta solución analítica parcial está basada en un modelo en el que todas las propiedades termofísicas del material son consideradas constantes. El método fue verificado mediante la comparación de la respuesta dinámica obtenida con la calculada por un modelo basado en el método de volúmenes finitos.

Más recientemente, Sourbron et al. 2014 utilizaron la solución analítica transitoria para un elemento de hormigón con tubos embebidos en la evaluación del comportamiento dinámico de sistemas TABS. Dado que ambos modelos asumen un comportamiento lineal de los materiales de construcción –toman propiedades termofísicas constantes-, no pueden ser, en principio, aplicados en la simulación de materiales con PCM.

Método de cálculo	Características:	Aplicabilidad del PCM
Diferencias finitas, volúmenes finitos o elementos finitos	-Cálculo detallado de la transferencia de calor -Elevado coste computacional	-Permite la simulación de los PCM (p. ej. método de la entalpía)
Circuitos equivalentes RC	-Bajo coste computacional -Es posible evaluar la exactitud de los modelos de forma sistemática mediante el contraste de su respuesta en frecuencia -Este análisis permite la síntesis de modelos que representan la dinámica del sistema con elevada exactitud	-Se puede aplicar, pero la verificación sistemática del modelo es en este caso más compleja (no es aplicable el análisis en frecuencia clásico)
Funciones de transferencia (Strand y Pedersen 2002)	-Bajo coste computacional -El método se puede adaptar al análisis de cualquier elemento cuyo comportamiento dinámico sea lineal	-No es aplicable a sistemas no lineales
Modelos analíticos (Sourbron et al. 2014) o semi-analíticos (Laouadi 2004)	-Bajo coste computacional	-No existen (o no se han desarrollado) soluciones analíticas de elementos con PCM

Tabla 1. 9. Principales características de los métodos de cálculo aplicados para la simulación de elementos de construcción activa.

1.6.2. Modelos integrados dentro de los programas de simulación energética de edificios para el cálculo de la transferencia de calor en elementos de construcción pasivos con PCM

En este apartado se recogen los principales aspectos de los modelos de elementos de construcción pasivos integradas dentro de los programas de simulación energética de edificios más habitualmente utilizados. En la tesis doctoral de Castell (2009) y, más recientemente, en el artículo de Al-Zaadi y Zhai (2013) se puede encontrar una amplia revisión y análisis de los mismos. Con respecto a estos trabajos anteriores, se recogen algunas actualizaciones y se presta especial atención a las contribuciones realizadas hasta el momento acerca de la verificación y validación de estos modelos.

1.6.2.1. EnergyPlus

Este programa de simulación energética de edificios ha utilizado tradicionalmente un algoritmo basado en el método de las funciones de transferencia para el cálculo de la conducción del calor a través de los elementos de construcción. En este sentido, Barbour y Hittle (2005) propusieron una modificación de este algoritmo para su adaptación a la simulación de elementos con PCM. Sin embargo, el modelo de diferencias finitas propuesto por Pedersen (2007) es el que finalmente ha sido integrado y consolidado en el programa informático desde su versión 2.0.0 (2007).

EnergyPlus permite la selección entre el modelo convencional basado en las funciones de transferencia y el modelo de diferencias finitas. El uso de este último algoritmo está indicado sólo en aquellos casos en los que se trabaja con materiales cuyas propiedades termofísicas dependen de la temperatura, pues exige una mayor carga computacional.

Este modelo es unidimensional, emplea la aproximación de segundo orden para la discretización espacial y permite la elección entre el método implícito y el de Crank-Nicolson para la aproximación numérica de la variación temporal de la energía térmica. Contempla la posibilidad de introducir la dependencia con la temperatura del calor específico y de la conductividad térmica. El tratamiento del cambio de fase está basado en el método del calor específico equivalente y en él se calcula la variación de energía térmica mediante la interpolación lineal, realizada a partir de la curva entalpía-temperatura introducida por el usuario, sobre el salto térmico correspondiente al incremento temporal considerado (Pedersen, 2007; The EnergyPlus Engineering Reference). El modelo no permite la simulación de los fenómenos de sub-enfriamiento o histéresis.

Chandrasekharan et al. (2013) realizaron mejoras en el código de EnergyPlus con el objetivo de introducir el fenómeno de histéresis. En las modificaciones que plantearon, desarrolladas en el entorno particular de su trabajo de investigación y que no están actualmente disponibles, utilizaron el modelo de Egolf y Manz (1994) para la definición de la curva entalpía temperatura.

1.6.2.1a. Verificación, inter-comparación y validación en EnergyPlus

Tabares-Velasco et al. (2012) llevaron a cabo una serie de estudios relacionados con la verificación y la validación del modelo de EnergyPlus para la simulación de elementos de construcción con PCM. En este trabajo, los autores verificaron los resultados del modelo con respecto a la solución analítica de Neumann para el problema de Stefan, se comparó su respuesta frente a una excitación senoidal con los resultados que proporcionaba el programa de cálculo de transferencia de calor Heating 7.3 (Childs, 2005) y se validó con los datos experimentales provenientes del ensayo de un cerramiento en una celda de tipo *hot box* (Haavi et al. 2011). Adicionalmente, se analizó la convergencia del modelo integrado en un caso de simulación similar al numerado como 600 en la norma para la verificación de programas de simulación energética de edificios ASHRAE 140 (2014) (*vid.* Capítulo 5, sección 5.2). A partir de este estudio, los autores fijan el incremento temporal máximo recomendable en 3 minutos y sugieren, en el caso de que se requiera un cálculo preciso de la demanda horaria de climatización, la utilización de resoluciones espaciales más finas que las que por defecto propone EnergyPlus. En relación a la comparación con los resultados experimentales, los autores mencionan que, al no poder introducir en el modelo los fenómenos de histéresis o subenfriamiento, se observan algunas desviaciones durante el proceso de solidificación del material.

Otro estudio interesante llevado a cabo en el entorno de EnergyPlus por uno de los investigadores anteriores es el de Tabares-Velasco (2012), en el que se investiga la influencia de la resolución con la que se define la curva entalpía-temperatura cuando es introducida en el programa. Este análisis se particulariza para el caso 600 mencionado anteriormente (ASHRAE 140). Se demuestra en esta situación particular, que pese a que la precisión de dicha curva no resulta influyente en el cálculo global de las necesidades de climatización anuales, sí que produce desviaciones relevantes en la evaluación de la demanda horaria. Basándose en estos resultados, el autor recomienda una diferencia máxima entre la curva real y la introducida al programa correspondiente a un error

cuadrático medio normalizado (NRMSD⁹, calculado mediante la división de la desviación media entre ambas curvas -RMSD¹⁰- por la capacidad de almacenamiento térmico latente, h_m) de 0,08.

En los trabajos de Chan (2011) y Campbell (2011), se realiza una comparación de los resultados del modelo de EnergyPlus con los empíricos obtenidos en la instalación experimental MINIBAT (habitación monitorizada y sujeta a condiciones de contorno controladas, descrita por Kuznik et al. 2009). Ambos trabajos coinciden en la buena predicción de la temperatura superficial de las paredes interiores de la celda. Dado que, tanto en estos últimos como en la publicación anteriormente citada de Tabares-Velasco et al. (2012) se utiliza el mismo PCM, el panel SSPCM denominado Energain por su fabricante (Dupont), resulta interesante la comparación de las respectivas conclusiones extraídas. Al contrario que Tabares-Velasco et al. (2012), Chan (2011) y Campbell (2011) no observaron desviaciones significativas en los resultados que pudieran ser asociadas al fenómeno de histéresis que experimenta el material. Debido a que se realizó en estos últimos trabajos (Chan 2011 y Campbell 2011) el contraste de la solución numérica con los resultados provenientes de un sistema físico más complejo (MINIBAT), existen algunos factores, tales como la precisión de las medidas experimentales, la sensibilidad del efecto del PCM sobre las magnitudes observadas de forma empírica, o la propagación de incertidumbres a través del modelo, que pudieron enmascarar, al realizar esta comparación, el mencionado fenómeno asociado al cambio de fase.

1.6.2.2. TRNSYS

Dentro del programa de simulación dinámica e integrada de sistemas energéticos TRNSYS, se ha desarrollado un significativo número de modelos para simular cerramientos con PCM. Estas herramientas de cálculo se han constituido como módulos independientes -denominados *types*- que pueden ser incorporados en las simulaciones. La principal información acerca de estas herramientas se recoge en la tabla 1.10.

Uno de los primeros ejemplos es el *type* 58 desarrollado por Stritih y Novak (1996) en el que se utiliza el método de la entalpía para la simulación del cambio de fase integrado dentro de un esquema numérico explícito. Otro de los más tempranos, es el elaborado por Jokisalo et al. (2000) (*type* 204), en el que se simula la conducción en un elemento tridimensional y el proceso de cambio de fase se contempla por medio del calor específico equivalente. Este modelo ha sido modificado y utilizado en el posterior trabajo de Ahmad et al. (2006).

Ibáñez et al. (2005) desarrollaron un modelo para el cálculo de la transferencia de calor a través de los cerramientos basado en un enfoque distinto. En su caso, el término fuente correspondiente al almacenamiento o liberación de energía asociados al proceso de cambio de fase era simulado mediante la integración de un circuito de agua ficticio embebido en el material. Pese a que esta misma idea también ha sido utilizada por Cabrol et al. (2012) en la simulación de elementos activos con PCM, actualmente se tiende, no tanto

⁹ Del inglés *Normalized Root Mean Standard Deviation*.

¹⁰ Del inglés *Root Mean Standard Deviation*.

a la adaptación de los algoritmos tradicionales de los programas de simulación de edificios, como al desarrollo de modelos numéricos que contemplen los fenómenos físicos específicos de la transferencia de calor en estos materiales.

Más recientemente, Kuznik et al. (2012) integraron en TRNSYS (*type* 260) un modelo de diferencias unidimensional, basado en el método del calor específico equivalente. Otro ejemplo similar es el desarrollado por Lu et al. (2014), en este caso se adopta la simplificación de utilizar un calor específico medio constante durante el proceso de cambio de fase. Por otra parte, el *type* 399 elaborado por Dentel y Stefan (2013), introduce la novedad con respecto a los modelos anteriores de introducir el fenómeno de histéresis. Además, se puede utilizar para el cálculo de elementos activos. Este aspecto se analizará con mayor profundidad en el apartado 1.6.3.1b.

1.6.2.2a. Verificación, inter-comparación y validación en TRNSYS

En el caso de TRNSYS, los trabajos de verificación y validación efectuados y publicados sobre estos modelos han sido más variados, pues dependían del contexto investigador en el que se habían desarrollado. En la tabla 1.10 se resume la información relacionada con esta cuestión.

Un interesante ejemplo en el que estas comprobaciones han sido publicadas es el del *type* 260 (Kuznik et al. 2010). Sobre este modelo se puede encontrar información detallada acerca del análisis de la estabilidad del método numérico (Kuznik et al. 2008), la intercomparación con otras herramientas de simulación de la respuesta estacionaria y transitoria de un elemento de construcción con PCM y el contraste con datos experimentales (Informe final de IEA-ECES Annex 23).

1.6.2.3. ESP-r

El algoritmo que este programa utiliza para el cálculo de la transferencia de calor por conducción a través de los materiales de construcción está basado en el método del calor específico equivalente. Este algoritmo se describe en el trabajo de Heim y Clarke (2004). El modelo denominado SPMCMP56 permite la simulación de materiales de cambio de fase con subenfriamiento.

Fallahi et al. (2012) realizaron una comprobación entre los resultados de este último módulo y los medidos en la instalación experimental descrita por Kosny et al. (2008) en la que el PCM se encuentra integrado en un compuesto con celulosa. El modelo obtuvo una buena predicción de la temperatura y del flujo de calor medido.

Modelo de simulación	Características generales del modelo	Aspectos relacionados con la simulación del PCM	Limitaciones	Verificación/ Validación
EnergyPlus- CFD (Perdersen 2007, The EnergyPlus Engineering Reference)	-Diferencias finitas -Conducción del calor 1D - Δt : implícito o Crank-Nicolson - Δx : segundo orden, mallado uniforme	-Calor específico equivalente (actualizado al incremento de temperatura correspondiente al instante de cálculo) - $\lambda(T)$	-Sub-enfriamiento -Histéresis -Convección natural en la fase líquida	- <u>Análisis de la convergencia</u> : caso 600 ASHRAE 140 (Tabares-Velasco et al. 2012) - <u>Verificación</u> : solución de Neumann (Tabares-Velasco et. al 2012) - <u>Intercomparación</u> : respuesta a excitación senoidal (Tabares-Velasco et. al 2012) - <u>Validación con datos experimentales</u> : cerramiento aislado (celda hot-box) (Tabares-Velasco et al. 2012), MINIBAT (Campbell 2011 y Chan 2011)
EnergyPlus- Modified CFD algorithm (Chandrasekharan et al. 2013)	-Diferencias finitas -Conducción del calor 1D - Δt : implícito o Crank-Nicolson - Δx : segundo orden, mallado uniforme	-Calor específico equivalente. Modelo de Egolf y Manz (1994) -Subenfriamiento - $\lambda(T)$	-Convección natural en la fase líquida	
TRNSYS <i>type</i> 58 (Stritih y Novak, 1996)	-Diferencias finitas -Conducción del calor 1D - Δt : implícito	-Método de la entalpía	-Sub-enfriamiento -Histéresis -Convección natural en la fase líquida	-Comparación con datos experimentales
TRNSYS <i>type</i> 204 (Jokisalo et al., 1999)	-Diferencias finitas -Conducción del calor 3D	-Método del calor específico equivalente	-Sub-enfriamiento -Histéresis -Convección natural en la fase líquida	
TRNSYS <i>type</i> 222 (Ibáñez et al. 2005)	-Funciones de transferencia	-Capa activa ficticia que introduce el término fuente correspondiente al cambio de fase	- $\lambda(T)$ -Subenfriamiento -Histéresis -Convección natural en la fase líquida	- <u>Comparación con datos experimentales</u> : respuesta transitoria del material aislado
TRNSYS <i>type</i> 101 (Ahmad et al. 2006)	-Diferencias finitas -Conducción 3D - Δt : Crank-Nicolson	-Calor específico medio equivalente durante el proceso de cambio de fase	-exactitud en la definición de la curva h-T -Subenfriamiento -Histéresis -Convección natural en la fase líquida	

TRNSYS <i>type</i> 260 (Kuznik et al., 2010)	-Diferencias finitas -Conducción 1D - Δt : implícito o Crank-Nicolson - Δx : segundo orden, mallado uniforme	-Calor específico equivalente actualizado al salto de temperatura del instante anterior de cálculo - $\lambda(T)$	-Sub-enfriamiento -Histéresis -Convección natural en la fase líquida	-Análisis de la estabilidad: (Kuznik et al. 2008) <u>Validación con datos experimentales:</u> resultados MICROBAT (Kuznik y Virgone, 2009)
TRNSYS <i>type</i> X (Bontemps, 2011)	-Modelo de red de resistencias y capacidades -Conducción 1D	-Calor específico equivalente	-Subenfriamiento -Histéresis -Convección natural en la fase líquida	-Comparación con datos experimentales: micro-cubículos
TRNSYS 399 (Dentel y Stefan, 2013)	-Conducción del calor 1D -Diferencias finitas - Δt : Crank-Nicolson - Δx : Segundo orden	-Método entalpía -Histéresis	-Subenfriamiento	-Comparación con datos experimentales: ensayos a escala de laboratorio como elemento activo (PCM macroencapsulado)
TRNSYS <i>type</i> 272 (Lu et al. 2014)	-Volúmenes finitos -Conducción del calor 1D - Δt : Crank-Nicolson - Δx : Segundo orden	-Calor específico medio equivalente durante el cambio de fase -Conductividad térmica constante en cada fase: líquida y sólida	-exactitud en la definición de la curva h-T -Subenfriamiento -Histéresis -Convección natural en la fase líquida	<u>-Comparación con datos experimentales:</u> fluctuación libre de temperaturas en cubículos
TRNSYS <i>type</i> 285 (Al-Saadi y Zhai, 2015)	- Δt : Implícito	-Método de la entalpía	-Curva h-T lineal definida a tramos	<u>-Intercomparación de modelos:</u> contraste con el <i>type</i> 260 (Kuznik et al., 2010) <u>-Comparación con datos experimentales:</u> resultados MICROBAT (Kuznik y Virgone, 2009)
ESP-r SPMCMP53 (Heim y Clarke 2004)	-Volúmenes finitos -Conducción del calor 1D	-Calor específico equivalente -Conductividad térmica constante en cada fase: líquida y sólida	-Subenfriamiento -Histéresis -Convección natural en la fase líquida	
ESP-r SPMCMP56 (Geissler, 2008)	-Volúmenes finitos -Conducción del calor 1D	-Calor específico equivalente -Conductividad térmica constante en cada fase: líquida y sólida	-Subenfriamiento -Histéresis -Convección natural en la fase líquida	<u>-Comparación con datos experimentales:</u> temperatura y flujo de calor habitación monitorizada (Falahi et al. 2012)

Tabla 1. 10. Relación de los modelos desarrollados en el entorno de programas de simulación energética de edificios.

1.6.2.4 Discusión

En el entorno de los programas de simulación energética de edificios se ha mostrado en las últimas décadas un notable interés por incluir algoritmos o módulos que permitieran el cálculo de la transferencia de calor a través de elementos constructivos con PCM.

Los modelos implementados poseen un nivel de detalle medio y en todos ellos se han adoptado hipótesis simplificadoras similares. La mayor parte, se limita al cálculo de la conducción del calor unidimensional a través de elementos de construcción con PCM. No se tienen en cuenta, por tanto, los efectos de la convección natural y los asociados al movimiento en la fase líquida que tienen lugar si éstos se integran en forma de macrocápsulas. Por otro lado, existen pocos modelos que permitan simular los fenómenos de histéresis o subenfriamiento en estos materiales. Sólo en el algoritmo de ESP-r SPMCMP56, en el *type* 399 en TRNSYS (Dentel y Stephan 2013) y en el modelo de Chandrasekharan et al. (2013) se contemplan aspectos de este tipo. Resulta conveniente analizar la verosimilitud de estas simplificaciones en cada estudio particular.

Tras el desarrollo e implementación de estos modelos a los programas de simulación energética de edificios, se ha continuado un interesante trabajo en la verificación, intercomparación y validación de los mismos. Aunque algunos autores siguen considerando esta labor insuficiente (Al-Saadi y Zhai, 2013) y este proceso -y los resultados presentados- ha dependido de la metodología particular seguida por cada investigador o desarrollador de código, existen actualmente modelos cuyos resultados correspondientes a las distintas etapas de este análisis han sido presentados (EnergyPlus, TRNSYS *type* 260), contribuyendo, de esta manera, notablemente a la fiabilidad de los mismos. Desde este punto de vista, resultan interesantes los intentos por unificar estos procedimientos. Por ejemplo, en el proyecto Annex 23 de la IEA-ECES se propone una batería de simulaciones para la intercomparación de los modelos unidimensionales de conducción del calor en cerramientos con PCM, así como se proporcionan los datos experimentales medidos en el microcúbiculo MICROBAT, desarrollado por Kuznik y Virgone (2009). Por su parte, Tabares-Velasco et al. (2012), con este mismo propósito, plantean una modificación sobre el caso 600 de la norma ASHRAE 140, que sirva como base para el contraste de los resultados de estos modelos.

Finalmente, en lo que atañe a la validación de los modelos a partir de datos empíricos, se han utilizado hasta el momento resultados de experimentos realizados a distintas escalas: análisis de la transferencia de calor de los cerramientos en instalaciones de laboratorio bajo condiciones de contorno controladas (Tabares-Velasco et al. 2012); estudio del comportamiento térmico en micro-cubículos (Kuznik y Virgone, 2009; Bontemps, 2011) y experimentación en instalaciones a escala prácticamente real (Campbel 2011, Chan 2011, Falahi et al. 2012 y Lu et al. 2014).

Aunque todas estas comprobaciones tienen interés, es preciso señalar que no siempre se tiene en cuenta la sensibilidad del sistema físico con respecto al fenómeno físico que se pretende verificar. Uno de los pocos ejemplos encontrados en los que se contempla esta cuestión es el publicado recientemente por Guichard et al. (2014), que describe parte

del trabajo dedicado a la validación del módulo de simulación de PCM dentro del modelo para simulación de edificios ISOLAB (Miranville 2002). Los autores reconocen la existencia de parámetros de entrada desconocidos o inciertos en el modelo y juzgan necesario un análisis de la sensibilidad dentro del proceso de validación. Por un lado, en el sistema físico (o en la magnitud que se mide) puede quedar oculta la influencia del PCM -el sistema carece de la sensibilidad suficiente con respecto a dicho efecto- y, por otro lado, una combinación de otros fenómenos puede interferir en la comparación de los resultados teóricos y empíricos -si existe cierta correlación entre los efectos globales de dichos fenómenos. Estos factores cobran mayor importancia en los sistemas físicos complejos, tales como las instalaciones para la demostración del funcionamiento de estos sistemas en edificios reales. Desde este punto de vista, la metodología propuesta por Palomo del Barrio y Guyon (2003) dentro del marco del proyecto Task 22 de la IEA-SHC puede resultar muy interesante para abordar la validación de los modelos que integran PCM en los cerramientos. Dicho procedimiento permite la identificación y agrupación del conjunto de fenómenos que es posible contrastar a partir de los datos empíricos provenientes de sistemas físicos complejos.

1.6.3. Modelos integrados dentro de los programas de simulación energética de edificios para el cálculo de la transferencia de calor en elementos de construcción activos

Tal como reconoce la norma europea EN 15377-3 (2008) el método de cálculo más adecuado para la evaluación teórica del comportamiento dinámico de los elementos termoactivos es su cálculo integrado en los programas de simulación de edificios. Por este motivo, se ha realizado una recopilación de información de los modelos que se poseen los principales programas de simulación energética de edificios. Las características más relevantes de estas herramientas de cálculo se recogen en la tabla 1.11.

1.6.3.1a. EnergyPlus

Originalmente, la introducción de modelos de elementos de construcción activos en EnergyPlus se realizó a través del algoritmo ya existente basado en el método de las funciones de transferencia. En el trabajo de Strand y Pedersen (2002) se describen las modificaciones aplicadas sobre este procedimiento numérico para su adaptación a la simulación de componentes activados mediante la circulación de agua o a través de resistencias eléctricas.

En lo que respecta a la transferencia de calor entre el circuito de agua y el elemento constructivo, EnergyPlus aplica un modelo basado en el análisis del intercambio por medio de las unidades de transferencia de calor y la eficiencia ($NTU-\epsilon$) en el que se asume una temperatura uniforme del material de construcción en la dirección axial de los tubos y se desprecia la variación temporal de la energía térmica del fluido circulante (The EnergyPlus Engineering Reference).

De esta forma, en un primer momento el uso de este modelo quedaba restringido a la simulación de materiales con un comportamiento lineal. A partir de la versión 6.0 (2009), se amplió su utilización al módulo de diferencias finitas.

Por otro lado, EnergyPlus incluye un modelo de funciones de transferencia bidimensional. No existe, sin embargo, un módulo análogo cuando se desea trabajar con el algoritmo de diferencias finitas (EnergyPlus: Input-Output reference).

No se ha encontrado información sobre la verificación o validación de elementos activos con PCM en el entorno de EnergyPlus. No obstante, en relación con el trabajo que ocupa a esta tesis, resulta interesante el publicado por Yu et al. (2014) en el que se analiza el funcionamiento del modelo basado en el método de las funciones de transferencia. En él, se comparó la respuesta estacionaria y transitoria de una losa de hormigón con un circuito de agua embebido, simulada por EnergyPlus y por un modelo de elementos finitos bidimensional. Los autores observaron que EnergyPlus sobreestimaba de una manera muy notable -las desviaciones rondaban el 40%- la potencia de calefacción o refrigeración que suministraba el elemento. En consecuencia, propusieron una interesante modificación para el circuito térmico de EnergyPlus, basada en el modelo de Koschenz y Lehmann (2000), según la cual, los efectos bidimensionales de la transferencia de calor se emulan por medio de la introducción de dos resistencias térmicas (puras) ficticias contiguas al nodo que representa la capa donde se aloja la tubería del elemento activo.

1.6.3.1b. TRNSYS

TRNSYS admite la introducción de capas activas dentro de los elementos de construcción y la simulación de techos refrescantes por medio de la adaptación del modelo teórico que desarrollaron Koschenz y Lehmann (2000), que permite la determinación de las resistencias térmicas equivalentes entre el circuito de agua y el resto de componentes, al módulo de cálculo de transferencia de calor basado en el método de las funciones de transferencia (TRNSYS, a transient system simulation program). La rango de aplicación del modelo está sujeta a ciertas restricciones geométricas: $diam/L < 0,2$ y $e/L > 0,3$. El modelo ha sido validado mediante la comparación con la repuesta dinámica calculada por un esquema bidimensional de elementos finitos (Koschenz y Dorer, 1999).

Por otro lado, el *type* 360 desarrollado por Fort (2001), permite la simulación de suelos radiantes e hipocaustos utilizando un modelo de diferencias finitas bidimensional. Según éste, el comportamiento del elemento completo es simulado mediante varias secciones representativas. La transferencia de calor en cada una de estas secciones se resuelve utilizando un mallado ortogonal aproximado. Este modelo ha sido contrastado con datos empíricos obtenidos en instalaciones de laboratorio tanto de suelo radiante como de hipocausto (Fort, 2001).

Más recientemente, Dentel y Stephan (2013) han incorporado el modelo anterior de Koschenz y Lehmann 2000 al *type* 399, que permite la simulación de elementos activos con PCM mediante un esquema de diferencias finitas unidimensional. El modelo se implementa como un algoritmo numérico externo al módulo *type* 56, al cual se acopla mediante la imposición de las condiciones de contorno apropiadas. En un trabajo anterior de los mismos investigadores (Dentel y Stephan 2010) se mostró la comparación de los resultados numéricos con la experimentación a escala de laboratorio de un panel de techo refrescante con PCM integrado en macrocápsulas. La predicción del modelo se ajustaba razonablemente a las observaciones empíricas: el error en temperatura fue cercano a los 0,5°C. Las

desviaciones en el cálculo de la energía almacenada y liberada fueron, en cambio, más significativas (en torno al 15%). Los autores atribuyeron estos errores a la simplificación que suponía considerar la transferencia de calor en el elemento unidimensional. Éste es el único modelo disponible que se ha encontrado durante la realización de esta tesis que integra este tipo de elementos con PCM en un programa de simulación energética de edificios.

1.6.3.1c. ESP-r

El programa emplea el modelo desarrollado por Laouadi (2004) para la simulación de elementos de construcción activos. Este modelo ha sido verificado mediante el contraste de su respuesta con la que ofrece un esquema de diferencias finitas bidimensional (Laouadi, 2004). Pese a que esta herramienta de cálculo, basada en la simplificación semi-analítica, sólo se puede estrictamente aplicar a materiales con un comportamiento lineal, en los trabajos de Kalz et al. (2006) y Kalz et al. (2007) se utilizó, junto con el modelo SPMCMP53 de Heim y Clarke (2004), para la simulación de un sistema de techo refrescante con PCM. En estas publicaciones no se presentó, sin embargo, un análisis acerca de la aproximación del mencionado modelo a la transferencia calor bidimensional en dicho elemento.

Programa	Características del modelo	Verificación / Validación	Simulación de PCM
EnergyPlus	-Funciones de transferencia: 1D ó 2D -Diferencias finitas: 1D	-Verificación: comparación Modelo MEF-2D, errores del 40% en la estimación de la potencia (Yu, 2014)	-Sólo 1D (desde la versión 6.0 2009)
TRNSYS <i>active layer</i> (integrado en el <i>type 56</i>)	-modelo de Koschenz y Lehmann, (2000) -funciones de transferencia adaptado	-Verificación: comparación modelo de elementos finitos (Koschenz y Dorer, 1999)	-No es posible
TRNSYS <i>type 160 Fort</i> (2001)	-diferencias finitas 2D	-Validación: ensayos de laboratorio sobre dos sistemas de suelo radiante	-No es posible
TRNSYS <i>type 705</i> (GEOTABS)	-diferencias finitas 3D	-	-No es posible
TRNSYS <i>type 399</i> (Dentel y Stephan, 2013)	-diferencias finitas 1D - Δt : Crank-Nicolson	-Datos experimentales: ensayos de laboratorio sobre paneles de techo refrescante	-Método de la entalpía -Contempla el fenómeno de histéresis
ESP-r (Laouadi, 2004)	-Modelo semi-analítico	-Comparación con modelo 2D	-En rigor, la transformación semi-analítica no se puede aplicar a los PCM

Tabla 1. 11. Relación de los modelos de elementos de construcción activa integrados en los principales programas de simulación energética de edificios.

1.6.3.2. Simulación de elementos de construcción activa con PCM

Como consecuencia de esta mencionada carencia de modelos disponibles para la simulación de estos elementos, los investigadores han optado en muchas ocasiones por el desarrollo de sus propias herramientas de cálculo. En la tabla 1.12 se describen los modelos que hasta el momento se han utilizado.

En primer lugar, se ha abordado el estudio de la transferencia de calor en los componentes activos con PCM de manera independiente al resto del edificio. Esta aproximación permite analizar el comportamiento en situaciones estacionarias y la evolución transitoria bajo condiciones de contorno simplificadas. Aunque puede resultar útil para la caracterización del sistema (determinación de la potencia suministrada en régimen nominal o de los tiempos característicos de respuesta) y permite la utilización de modelos más detallados, el análisis resulta insuficiente para la evaluación de su comportamiento en condiciones reales de operación.

Amir et al. (1998) y Farid et al. (1999) utilizaron sendos modelos unidimensionales para el estudio de la transferencia de calor en distintos sistemas de suelo radiante eléctrico con PCM macroencapsulado. Posteriormente, Farid et al. (2001) ampliaron el modelo unidimensional para el estudio de un sistema de suelo radiante, activado mediante un circuito de agua. Más recientemente, Jin et al. (2011) utilizó un modelo unidimensional para la simulación de un elemento de suelo radiante con dos capas de PCM. En este modelo se propone la introducción de una conductividad térmica equivalente en la capa de suelo en la que se alojan los tubos de tal manera que el efecto de la transferencia de calor bidimensional quede reflejada. Esta conductividad térmica ficticia se calcula a través de las fórmulas propuestas por Jin et al. (2010).

Ansuini et al. (2012) analizaron un modelo bidimensional basado en el método de los elementos finitos. El modelo fue calibrado a través de los datos experimentales extraídos de una instalación de ensayo del elemento aislado de suelo radiante (similar al propuesto por la norma EN 1264-2). Aunque este modelo permitió la primera comparación entre varias configuraciones, fue posteriormente integrado dentro de uno más complejo que permitía la simulación del espacio climatizado completo (implementado dentro del entorno Comsol Multiphysics).

Huang et al. (2014) utilizaron un modelo bidimensional implementado en el entorno de ANSYS para el estudio de la transferencia de calor en una configuración novedosa de suelo radiante con PCM macroencapsulado y tubos capilares de agua. Zhou et al. (2015) y Cheng et al. (2015) estudiaron la distribución de temperaturas y la influencia de la conductividad térmica del PCM respectivamente en diferentes sistemas de suelo radiante por medio de modelos bidimensionales.

Por otro lado, los investigadores han realizado estudios numéricos del comportamiento térmico de elementos de suelo radiante integrados en modelos de simulación energética de edificio.

Koschenz y Lehmann (2004) crearon un nuevo *type* en el entorno de TRNSYS para la simulación de un sistema de techo activo con PCM y tubos capilares. Este elemento se simulaba por medio de un modelo unidimensional de diferencias finitas. Los investigadores

presentaron los resultados satisfactorios de la comparación entre la predicción del modelo y los datos experimentales de la respuesta del prototipo de panel refrescante cuando cesa el flujo de agua de refrigeración y se mantiene una carga térmica sobre su superficie constante. El cálculo integrado dentro de un edificio permitió el estudio del comportamiento y el dimensionamiento del sistema. En los trabajos de Lin et al. (2004) y Lin et al. (2007), se realizó la análisis del comportamiento de diferentes sistemas de suelo radiante eléctrico haciendo uso de un modelo propio para la simulación energética de edificios.

Por su parte, Dentel y Stephan (2010) desarrollaron un nuevo módulo propio en TRNSYS análogo, en lo que respecta a la modelización del intercambio de calor entre los tubos y el elemento, al anterior de Koschenz y Lehman (2004). En su caso, se añadió la posibilidad de simular el fenómeno de histéresis. El modelo se contrastó con resultados experimentales obtenidos mediante la aplicación de ensayos de laboratorio a una unidad de panel refrescante con diferentes PCM encapsulados. Más recientemente (Dentel y Stephan 2013), una versión más avanzada de este modelo está comercialmente disponible bajo la denominación de *type 399* (Claros-Marfil et al. 2014).

Cabrol et al. (2012) hizo uso de una metodología similar a la propuesta por Ibáñez et al. (2005), adaptando el modelo de simulación energética de edificios de TRNSYS para la inclusión de PCM mediante la integración de elementos activos ficticios que emulan el término fuente de generación o disipación de calor asimilable al cambio de fase.

En los casos en los que los efectos asociados a la transferencia de calor bidimensional en la respuesta térmica de estos elementos son más acusados, algunos investigadores han optado por la integración de modelos bidimensionales (Zeng et al. 2009, Ansuini et al. 2011) y tridimensionales (Tzivanidis et al. 2012) dentro de programas para simulación de edificios.

1.6.3.2a. Validación-Verificación

Como se ha visto anteriormente, los modelos de simulación que hasta el momento se han utilizado para el estudio del comportamiento de elementos de construcción activos con PCM han sido desarrollados de manera independiente en cada caso por los investigadores. En consecuencia, los procedimientos de verificación y validación llevados a cabo en cada trabajo difieren entre sí.

La solución analítica de Neumann para el problema de Stefan ha sido utilizada frecuentemente para la verificación de los modelos (Amir et al. 1998, Farid et al. 1999 y Koschenz y Lehmann 2004). Por otro lado, en la etapa de validación a través de la comparación con datos experimentales, se han utilizado de ensayos a diferentes escalas. Mientras que Koschenz y Lehmann (2004), Dentel y Stephan (2010) y Ansuini et al. (2012) realizaron la comparación con los datos provenientes de una instalación a escala de laboratorio -en condiciones de funcionamiento controladas-, en los trabajos de Lin et al. (2004), Lin et al. (2007), Zeng et al. (2009), Huang et al. (2014) y Zhou et al. (2015) se tomaron los resultados de la experimentación en instalaciones demostrativas con elementos activos con PCM (integrados en cubículos o habitaciones monitorizadas).

En ensayo de este tipo de sistemas bajo condiciones de contorno controladas en instalaciones de laboratorio proporciona información valiosa para la validación de los modelos numéricos. Desde este punto de vista, la definición de condiciones de ensayo unificadas que permitieran caracterizar la respuesta transitoria y estacionaria de estos sistemas podría resultar interesante para la validación de los modelos de simulación.

Por otro lado, en la comparación de los resultados numéricos con los de instalaciones experimentales de suelo radiante a media escala (cubículos o habitaciones) es preciso -de manera análoga al correspondiente análisis de los modelos de elementos pasivos- profundizar en el análisis sensibilidad y propagación de incertidumbres.

1.6.3.3. *Discusión*

De manera similar a lo que sucede con los modelos para la simulación de los PCM en elementos de construcción pasivos, en el caso de los componentes activos, el comportamiento no lineal de estos materiales impide la utilización de los algoritmos (funciones de transferencia) o las herramientas de análisis (respuesta en frecuencia) más eficientes desde el punto de vista del coste computacional. De este modo, los programas de simulación energética de edificios necesitan aplicar ciertas modificaciones para poder abordar este tipo de cálculos. Sin embargo, el grado de desarrollo de los modelos de elementos activos con PCM ha sido menor. Durante el periodo de realización de esta tesis, sólo el algoritmo de diferencias finitas de EnergyPlus, desde su versión 6.0 (2009), y, posteriormente, el *type 399* desarrollado por Dentel y Stefan (2013) permiten el cálculo de estos componentes integrado en programas de simulación de edificios reconocidos dentro de este ámbito de investigación.

A causa de esta escasez de herramientas de simulación, los investigadores han desarrollado sus propios modelos. En ellos, se utiliza un nivel de aproximación similar para el cálculo de la transferencia de calor en el PCM. En la tabla 1.12 se recoge la información principal relacionada con estos modelos. Los algoritmos numéricos están basados en un esquema de diferencias finitas en los que el cambio de fase se simula por medio del método de la entalpía o del calor específico equivalente y que, en general, no suelen contemplar los efectos de histéresis o subenfriamiento.

En cambio, el nivel de detalle utilizado para la descripción de la geometría varía según el criterio de los distintos autores. Desde el punto de vista de la integración a los programas de simulación energética de edificios, resulta interesante el modelo unidimensional propuesto por Koschenz y Lehmann (2004). Sin embargo, no se han presentado hasta el momento análisis completos que demuestren su validez para simular los fenómenos de transferencia de calor bidimensional propios de los elementos termoactivos con PCM. Por ejemplo, Koschenz y Lehmann (2004) sólo mostraron la comparación de los datos experimentales y teóricos una vez que cesa la circulación de agua de refrigeración, etapa en la que predomina la conducción unidimensional del calor. Por su parte, Dentel y Stephan (2010) observaron unas desviaciones apreciables entre la respuesta dinámica del panel de techo activo con PCM y la predicción teórica del modelo unidimensional. Además, atribuyeron a esta simplificación la diferencia del 15% observada en la energía térmica absorbida y liberada por el elemento. En ninguno de estos trabajos se

realizó un análisis teórico detallado -a través de la comparación con modelos bidimensionales- sobre el grado de aproximación que se logra con esta herramienta de simulación. A la luz de estos resultados anteriores, no es posible conocer la validez de estos modelos, de modo que resulta aconsejable, en cada caso concreto, realizar un análisis previo acerca del nivel de exactitud que proporcionan.

Modelo de simulación	Elemento	Características generales del modelo	Limitaciones	Verificación / Validación
Amir (1998)	Suelo radiante eléctrico	-Conducción 1D - Δt : explícito -Método de la entalpía -Convección natural: λ_{ef}	-Simulación del elemento aislado -Histéresis y subenfriamiento	-Verificación: solución de Neumann -Comparación con datos experimentales (escala de laboratorio) (λ_{ef} calibrada)
Farid (1999) y Farid (2001)	Suelo radiante eléctrico (Farid, 1999) Suelo radiante con PCM macroencapsulado (Farid, 2001)	-Conducción 1D - Δt : explícito -Calor específico equivalente -Convección natural: λ_{ef}	-Simulación del elemento aislado -Histéresis y subenfriamiento	-Verificación: solución de Neumann (Farid, 1999) -Comparación con datos experimentales (escala de laboratorio) (Farid, 1999) (Farid, 2001)
Lin et al. (2004)	Sistema de suelo radiante eléctrico flotante (SSPCM)	-Integrado en un modelo de simulación de edificios -Conducción 1D -Método de la entalpía	-Histéresis y subenfriamiento	-Validación: comparación con los resultados de un cubículo experimental (Lin, 2005)
Koschenz y Lehmann (2004)	Techo refrescante	-Type integrado en TRNSYS -Conducción 1D -Resistencia térmica adaptada (Koschenz y Lehmann, 2000) -Calor específico equivalente	-Histéresis y subenfriamiento	-Verificación: solución de Neumann -Comparación: ensayos de la respuesta (sólo proceso de descarga) del elemento aislado (escala de laboratorio)
Kalz et al. (2006), Kalz et al. (2007)	Techo refrescante	-implementación en ESP-r -activación térmica: modelo de Laouadi (2004) -PCM: modelo SPMCMP53 de Heim y Clarke (2004) (<i>vid.</i> Tabla 1.10)	-Histéresis y subenfriamiento	-Calibración: resultados experimentales de un sistema activo convencional (sólo almacenamiento sensible)
Lin et al. (2007)	Sistema de suelo radiante híbrido (radiante y convectivo) eléctrico con SSPCM	-Integrado en un modelo de simulación de edificios -Conducción 1D -Método de la entalpía	-Histéresis y subenfriamiento	-Validación: comparación con los resultados de un cubículo experimental
Zeng et al. (2009)	Sistema de suelo radiante flotante (SSPCM)	-Integrado en un modelo de simulación de edificios -Conducción 2D -Método de la entalpía	-Histéresis y subenfriamiento	-Validación: comparación con los resultados de un cubículo experimental
Dentel y Stephan (2010)	Paneles de techo refrescante	-Type integrado en TRNSYS -DF: Conducción 1D -Resistencia térmica adaptada (Koschenz y Lehmann, 2000) -Método de la entalpía -Contempla histéresis	-Subenfriamiento	-Comparación: ensayos de la respuesta del elemento aislado (escala de laboratorio)

Ansuini et al. (2011)	Sistema de suelo radiante seco (PCM granulado)	-DF: conducción 2D -integrado en un modelo de habitación (Comsol Multiphysics)	-Histéresis y subenfriamiento	-Calibración con resultados experimentales (escala de laboratorio)
Jin et al. (2011)	Suelo radiante	-Conducción 1D -Corrección efectos 2D: adaptación de la conductividad térmica (Jin et al. 2010) -Calor específico equivalente	-Simulación del elemento aislado -Histéresis y subenfriamiento	
Tzivanidis et al. (2012)	Techo refrescante	-Integrado en un modelo de simulación de edificios -Conducción 3D - Δt : implícito - Δt : mallado ortogonal -Calor específico equivalente	-Histéresis y subenfriamiento	-Validación modelo activo: sin PCM (Antonopoulos et al. 1997)
Cabrol et al. (2012) TRNSYS	Suelo radiante	-integrado en un programa de simulación de edificios -cambio de fase: elemento activo equivalente (Ibáñez et al. 2005)	-Histéresis y subenfriamiento	
Huang et al. (2014)	Sistema de suelo radiante con tubos capilares	-MEF conducción 2D (ANSYS) -Método entalpía	-Simulación del elemento aislado -Histéresis y subenfriamiento -Convección natural	-Comparación con resultados experimentales
Zhou et al. (2015)	Suelo radiante	-Conducción 2D -método de la entalpía	-Simulación del elemento aislado -Histéresis y subenfriamiento -Convección natural	-Comparación con datos experimentales
Cheng et al. (2015)	Suelo radiante eléctrico (SSPCM)	-Conducción 2D -Calor específico equivalente	-Histéresis y subenfriamiento	

Tabla 1. 12. Relación de modelos de elementos de construcción activa con PCM.

1.7. Conclusiones del capítulo

La incorporación de PCM a los elementos activos de calefacción y refrigeración integrados en superficies interiores supone un aumento notable, para un intervalo relativamente pequeño de temperaturas, de su capacidad de almacenamiento de energía térmica. Esta característica se ha utilizado en aplicaciones donde existe un desfase relevante entre la producción y demanda de energía, principalmente para su operación bajo estrategias de desplazamiento del consumo eléctrico al periodo de menor demanda y en la integración de la energía solar. Otros autores mencionan la posibilidad de integrar fuentes de baja exergía, tales como la refrigeración nocturna o las torres de refrigeración, y su aplicación para lograr una mayor estabilización de la temperatura interior.

El almacenamiento térmico latente permite absorber y liberar la energía con una oscilación de temperaturas notablemente reducida en comparación con los sistemas tradicionales. Diferentes estudios muestran la capacidad del sistema para desplazar prácticamente la totalidad de la energía empleada en calefacción o refrigeración al periodo nocturno (Lin et al. 2004 y 2005, Cabrol y Rowley 2012 y Tzivanidis et al. 2012) o para liberar aproximadamente un 50% de la energía solar almacenada durante las horas sin esta aportación (Zeng et al. 2010, Huang et al. 2014). Sin embargo, no en todos los sistemas propuestos se han obtenido resultados plenamente satisfactorios: en algunos casos, la oscilación térmica de la temperatura interior excedía el rango de confort (Lin et al. 2005 y Cheng et al. 2015).

En resumen, los resultados de las investigaciones publicadas hasta el momento demuestran el interés en continuar el trabajo sobre el análisis teórico y experimental de este tipo de sistemas de construcción activos. No obstante, la existencia de experimentos cuyos resultados no han sido plenamente satisfactorios, señala la importancia que tienen las etapas de estudio previo, diseño y dimensionamiento de estos componentes. Por último, la cantidad de artículos publicados en relación con estos sistemas y sus aplicaciones o dedicados al desarrollo de materiales es muy abundante. Por este motivo, se ha elaborado, a partir del conjunto de artículos de investigación y patentes revisados, la tabla 1.13, en la que se sintetiza esta información. En ella, se identifican las distintas alternativas de diseño para estos componentes y se recogen sus principales características relacionadas con los siguientes criterios:

- viabilidad constructiva (VIAB. CONST.)
- viabilidad económica: costes de inversión y operación (VIAB. EC.)
- comportamiento térmico del sistema: emisión térmica, dinámica del sistema y capacidad de almacenamiento (COMP. TERM.)
- cuestiones particulares relacionadas con los PCM (p. ej. estabilidad y durabilidad, compatibilidad química, histéresis y subenfriamiento, etc.)
- cuestiones relacionadas con la viabilidad técnica (VIAB. TEC.):
 - resistencia mecánica
 - comportamiento ante el fuego

	Opciones de diseño	Ventajas	Desventajas
TIPO DE SISTEMA	Sistema tradicional: conformación <i>in situ</i> (Farid y Kong 2001)	VIAB. CONSTR.: -sistema más simple VIAB. EC.: -menor coste de material y de los elementos del sistema COMP. TERM.: -reducción de las resistencias de contacto	VIAB. EC.: -mayores tiempos de conformación VIAB. CONSTR.: -menor control sobre la puesta en obra
	Sistemas de instalación en seco (p. ej. Lin et al. 2005, Ansuini et al. 2011, Cheng et al. 2015)	VIAB. EC.: -reducidos tiempos de montaje VIAB. CONSTR.: -apto para obras de rehabilitación. -facilidad en el desmontaje y reparación. -Sistema más compacto	VIAB. EC.: -mayores costes asociados al sistema COMP. TERM.: -resistencias térmicas de contacto entre los elementos (Lin et al. 2005, Cheng et al. 2015) DISEÑO: -proceso de diseño y desarrollo más complejo
	Sistemas modulares (Koschenz y Lehmann 2004, Klinker et al. 2014)	VIAB. EC.: -reducidos tiempos de montaje VIAB. CONSTR.: -mayor control sobre la puesta en obra, -desmontaje y reparación -más adecuados en sistemas de techo -aptos para obras de rehabilitación	VIAB. EC.: -mayores costes asociados al sistema DISEÑO: -proceso de diseño térmico más complejo (Koschenz y Lehmann 2004, Klinker et al. 2014)
NATURALEZA PCM	PCM orgánico	COMP. TERM.: -subenfriamiento e histéresis limitados VIAB. TÉCNICA: -durabilidad del material, compatibilidad química	COMP. TERM.: -conductividad térmica reducida VIAB. EC.: -coste del material VIAB. TÉCNICA: -comportamiento ante el fuego
	PCM inorgánico (p. ej. Farid y Kong 2001)	VIAB. EC.: -coste del material VIAB. TÉCNICA: -comportamiento ante el fuego, material no inflamable	COMP. TERM.: -subenfriamiento e histéresis (necesarios aditivos, p. ej. Farid y Kong, 2001) VIAB. TÉCNICA: -durabilidad del material (segregación de fases), compatibilidad con otros materiales de construcción
INTEGRACIÓN DEL PCM	Macrocápsulas (p.ej. Farid y Kong 2001)	VIAB. TÉCNICA: -prevención de la fuga del PCM	VIAB. EC.: -coste del encapsulado (Schossig et al. 2005) VIAB. CONST.: -poca compatibilidad con las sistemas y técnicas constructivos convencionales VIAB. TÉCNICA: -resistencia mecánica de las cápsulas COMP. TERM.: -baja conductividad del PCM sólido (Schossig et al. 2005) -resistencia térmica asociada a los volúmenes libres para la expansión -resistencia térmica asociada al contacto entre componentes

	SSPCM (p.ej. Lin et al. 2005, Zeng et al. 2010)	VIAB. TÉCNICA: -prevención de la fuga del PCM, estabilización en una estructura sólida	VIAB. TÉCNICA: -la baja rigidez del compuesto puede condicionar los diseños (suelos técnicos, p. ej. Lin et al. 2004, Cheng et al. 2015) -comportamiento al fuego del material orgánico COMP. TERM.: -baja conductividad térmica -resistencia térmica asociada al contacto entre componentes
	Compuesto con un material tradicional de construcción (Koschenz y Lehmann 2004)	VIAB. CONSTR.: -compatible con las técnicas habituales en construcción VIAB. EC.: -material matriz de bajo coste COMP. TERM.: -integrado en compuestos de mortero/hormigón, se mejora la conductividad térmica con respecto a la original del PCM VIAB. TÉCNICA: -mejora del comportamiento frente al fuego de los PCM orgánicos con respecto a los SSPCM	VIAB. TEC.: -la cantidad de PCM admisible está condicionado por el tipo de material matriz COMP. TERM.: -en los compuestos de yeso y PCM, la conductividad térmica puede ser insuficiente (Koschenz y Lehmann, 2004)
TIPOS DE CONDUCTO	Tubos tradicionales (p. ej. Zeng et al. 2010)	VIAB. EC.: -sistema más económico	COMP. TERM.: -peor contacto térmico
	Tubos capilares (p. ej. Koschenz y Lehmann 2004)	COMP. TERM.: -aumento de la emisión térmica y reducción del tiempo de puesta en marcha (Zhou et al. 2015)	VIAB. EC.: -sistema más costoso

Tabla 1. 13. Principales características de las alternativas de diseño identificadas a través de la revisión de artículos de investigación y patentes.

Considerando el tipo de sistema, los elementos de instalación en seco y los basados en diseño modular han atraído el interés de los investigadores e inventores, gracias a las ventajas que aportan relacionadas con su puesta en obra (reducción de los tiempos de montaje, mayor control de la calidad, adaptación para las obras de rehabilitación de edificios, etc.). Sin embargo, el éxito en la implementación del almacenamiento con PCM en este tipo de sistemas, precisa, desde el punto de vista térmico, de un diseño cuidadoso y específico de los principales componentes que intervienen en el proceso de intercambio de calor. Buenos ejemplos de este desarrollo son los trabajos llevados a cabo por Koschenz y Lehmann (2004) y Klinker et al. (2014). Por el contrario, los sistemas de suelo radiante o refrescante tradicionales conformados a partir del fraguado de la losa de mortero, presentan la ventaja, con respecto a los paneles modulares o a los sistemas de instalación en seco, de eliminar las resistencias térmicas asociadas al ensamblaje de distintos componentes. Con respecto al coste de cada sistema existen factores contrapuestos sobre los que es preciso profundizar en cada aplicación específica.

Los aspectos que intervienen en la selección del tipo de PCM se han discutido ampliamente en la literatura (Zalba et al. 2002, Cabeza et al. 2011). De manera específica, en esta aplicación concreta cobran más importancia los siguientes:

- subenfriamiento e histéresis: la presencia de estos fenómenos está ligada a la pérdida de eficiencia en la liberación de la energía almacenada, en el caso de su aplicación en calefacción, o, en refrigeración, a la necesidad de rebajar la temperatura del agua de refrigeración suministrada y al riesgo de aparición de condensaciones;
- conductividad térmica: muchos trabajos coinciden en que, para asegurar un funcionamiento adecuado del sistema, la conductividad efectiva del material tiene que superar cierto valor. Frente a este problema se han propuesto diferentes soluciones: uso de aditivos (Zeng et al. 2010, Cheng et al. 2015), integración en matrices de material con elevada conductividad (DE102009055441A1) y utilización de sistemas de aletas (Koschenz y Lehmann 2004, Ansuini et al. 2011)
- coste del material: condiciona de manera directa el coste del sistema
- resistencia ante el fuego: la integración de materiales orgánicos puede comprometer esta característica de los sistemas.

La integración de estos materiales es uno de los principales aspectos. Además de cumplir su función de retener de forma estable el PCM, el método de integración seleccionado tiene que facilitar la transferencia de calor entre el material y el resto de elementos. Desde este punto de vista, la incorporación del PCM en compuestos sobre una estructura de material con una mayor conductividad térmica, tales como los hormigones o mortero, puede resultar ventajoso. Por otro lado, si se utilizan macrocápsulas se debe tener en cuenta su repercusión en el coste económico (Schossig et al. 2005).

1.7.1. Determinación de propiedades y análisis de características de materiales compuestos de construcción con PCM

Dentro del ámbito de la determinación de propiedades de estos materiales, existe la necesidad de profundizar en el desarrollo y consolidación de las metodologías para la determinación de la curva entalpía-temperatura. En general, la principal dificultad de esta caracterización está relacionada con el tamaño de las muestras, a su vez condicionado por el grado de heterogeneidad de los compuestos. Estas mayores dimensiones favorecen la existencia de gradientes de temperatura en su interior durante los análisis térmicos, lo cual complica el procedimiento experimental y el tratamiento de los datos empíricos. La utilización de métodos de análisis térmico en dispositivos experimentales basado en los equipos de placa caliente o placa caliente guardada es una prometedora solución para las dificultades que plantean estos materiales. Sin embargo, estos métodos todavía requieren avances en distintas cuestiones tales como la unificación de procedimientos de medida, la verificación de las instalaciones experimentales y en la incorporación, por parte de los fabricantes de equipos, de las modificaciones necesarias para la realización de estos ensayos.

Por otro lado, el método T-history se puede utilizar para el análisis de ciertos compuestos con PCM. Su uso está condicionado por el grado de heterogeneidad del material y la dimensión máxima de la muestra que exige la condición asociada al número de Biot.

Aunque existen métodos, como el propuesto por Lázaro et al. (2008), para evaluar la exactitud del método a través de la verificación de la medida de las sondas de temperatura y la comparación de los resultados con materiales de referencia, algunos autores señalan (p. ej. Hong et al. 2004) el interés en profundizar en el estudio del efecto de los gradientes térmicos en el interior de las muestras. La influencia sobre los resultados de esta falta de uniformidad en la temperatura, que hasta el momento no ha sido cuantificada o estudiada, puede ser más relevante cuando se ensayan compuestos sólidos. Por otro lado, la evaluación de la incertidumbre a través de la propagación de los errores de medida de los sensores de temperatura es otra cuestión importante. Hasta ahora, los únicos análisis publicados (Zhang et al. 1999, Rady et al. 2009) se aplican a sus métodos particulares para el tratamiento de los datos experimentales y solamente se centran en la estimación de la entalpía de cambio de fase. La ampliación de este análisis de la propagación de errores a los métodos que permiten la determinación de la curva entalpía-temperatura, puede aportar información interesante para la evaluación de la exactitud del método.

Asimismo, debido a que las medidas de estos métodos experimentales pueden estar sujetas a desviaciones apreciables (± 5 -10%), resulta conveniente tenerlas en cuenta, a través del análisis de propagación de incertidumbres, cuando se utilizan en los estudios teóricos.

En lo que atañe al resto de propiedades termofísicas que generalmente se utilizan como datos de entrada en los modelos numéricos (conductividad térmica y densidad), algunos autores han ajustado modelos teóricos para describir las variaciones que se producen en ellas cuando se añade PCM a un determinado material compuesto. Sin embargo, estos ajustes tienen, en principio, únicamente validez para un tipo de material muy concreto, ya que existen otros factores, tales como la porosidad, con gran influencia en estas propiedades. Resulta conveniente, por tanto, realizar estas medidas de los materiales compuestos utilizados.

Por otra parte, la reacción frente al fuego de los elementos de construcción que incorporan materiales orgánicos puede ser un aspecto crítico que comprometa su viabilidad técnica. Concretamente, la adición de PCM de esta naturaleza a los compuestos habituales en la edificación (yeso u hormigón) deteriora su respuesta ante el fuego. La proporción másica de esta sustancia en el compuesto tiene una influencia principal en esta degradación, aunque también puede existir un cierto efecto asociado a la técnica utilizada para su incorporación. Así pues, el comportamiento al fuego es una de las cuestiones que debe ser considerada cuando se propone la utilización de estos materiales compuestos.

1.7.2. Simulación de elementos activos con PCM

Dadas las características del funcionamiento de los estos elementos termoactivos, en el momento de realizar una predicción terórica acerca de su comportamiento, resulta conveniente integrar los cálculos dentro del modelo completo del edificio, de manera que se pueda tener en cuenta su interacción con el resto de componentes. Sin embargo, la adaptación de los métodos habitualmente utilizados en los programas de simulación energética de edificios para la simulación elementos activos con PCM presenta diversas dificultades. Debido a esta razón, son escasas las herramientas de cálculo que posibilitan

esta evaluación numérica. De esta forma, sólo EnergyPlus desde su versión 6.0 (2009) y, más recientemente, el type 399 desarrollado por Dentel y Stephan (2013) pueden se pueden utilizar para este propósito. Sin embargo, estos modelos están basados en esquemas de diferencias finitas unidimensionales, por lo que es preciso analizar con detalle el nivel de aproximación que proporcionan para el cálculo de la transferencia de calor bidimensional habitual en los elementos termoactivos.

Capítulo 2. Objetivos

Los resultados de los trabajos publicados hasta el momento sobre la aplicación de los elementos de construcción activos con PCM alientan a continuar trabajando en esta línea. Al mismo tiempo, el análisis de estas publicaciones muestra la necesidad de profundizar en las líneas de investigación ligadas a la determinación de propiedades, al desarrollo de modelos numéricos y a la evaluación del comportamiento de estos sistemas en instalaciones experimentales.

2.1. Objetivos generales

Así pues, los objetivos generales de la tesis se centran en el estudio de algunos de los aspectos principales que intervienen en el análisis y diseño de elementos de construcción termoactivos con PCM. Están relacionados, por una parte, con la determinación de las propiedades y análisis de características de los materiales y, por otra parte, con el estudio teórico de estos componentes a través de la simulación numérica. Este tipo de trabajo, fundamentalmente ligado a cuestiones metodológicas, está encaminado al diseño y análisis teórico de una instalación experimental para el ensayo de un sistema de suelo radiante con PCM. En la figura 2.1 se representa, por medio de un diagrama de flujo, el planteamiento de la tesis y la interrelación que se establece entre sus principales bloques.

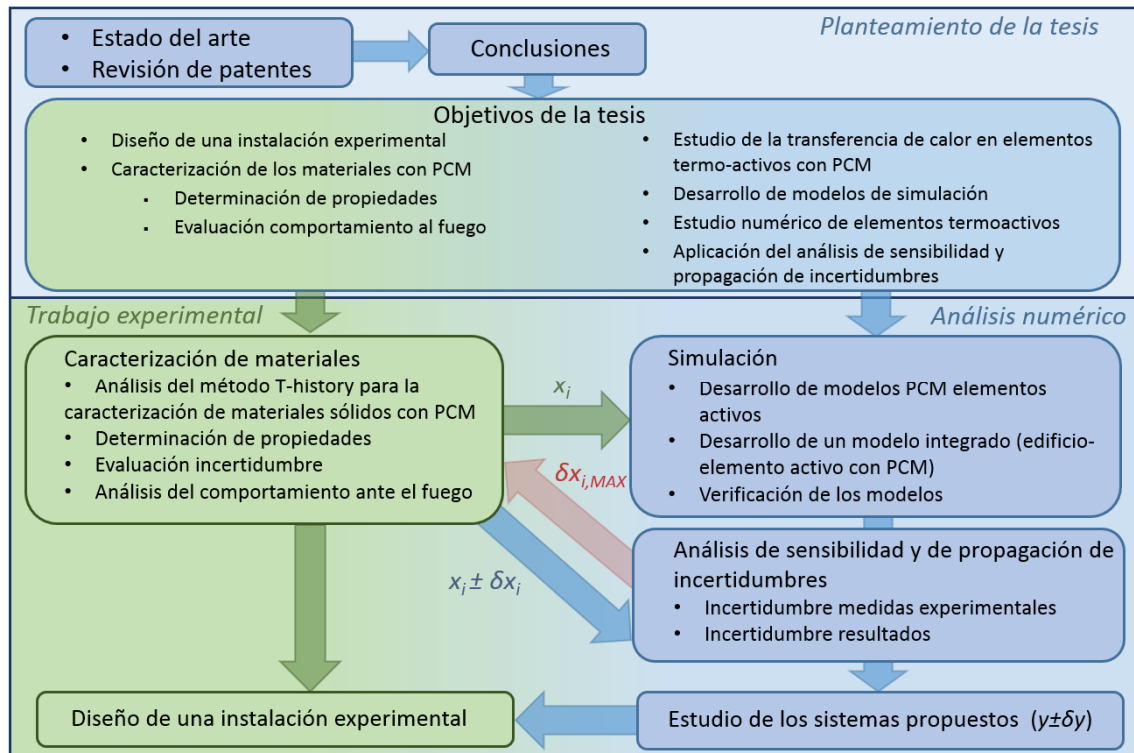


Fig. 2. 1. Representación esquemática de la estructura de la tesis mediante un diagrama de flujo.

2.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos se desglosan en los siguientes apartados, que corresponden a las distintas líneas de trabajo de las que se compone la tesis. Estos objetivos se relacionan directamente con las conclusiones extraídas de la revisión del estado del arte. De esta manera, en las tablas 2.1, 2.3 y 2.3 se enumeran estos objetivos específicos y se establece su vinculación a las conclusiones del primer capítulo.

2.2.1. Diseño de una instalación experimental

La aplicación de los PCM en la edificación cuenta hoy con numerosos estudios publicados, por lo que la revisión exhaustiva de artículos de investigación y de patentes ha permitido sintetizar la valiosa información disponible relativa al diseño de los elementos activos (Tabla 1.2 del capítulo 1). En base al análisis realizado de estos trabajos anteriores se ha determinado el tipo de sistema (pre-diseño) que se estudia en esta tesis.

Teniendo en cuenta distintos factores relacionados con la transferencia de calor y con la viabilidad técnica y económica, se ha optado por un pre-diseño del elemento activo en el que el PCM, embebido en gránulos de material poroso, se incorpora dentro del mortero que forma habitualmente la capa de recrecio en los sistemas convencionales de suelo radiante. La selección de estas partículas con PCM absorbido se ha realizado entre los materiales actualmente comercializados.

Finalmente, a partir de las propiedades termofísicas determinadas de los materiales que componen el elemento activo y de la simulación de su comportamiento térmico, se plantea la elaboración del diseño y dimensionamiento de la instalación experimental.

Conclusiones del estado del arte	Objetivos	Capítulo
1) Elevada cantidad de información: materiales, alternativas de diseño, patentes, aplicaciones	1-E) Síntesis información disponible: patentes, materiales, aplicaciones	1 (tabla 1.13)
2) Interés en el estudio teórico y experimental del funcionamiento de los sistemas TABS-PCM	2-E) Pre-diseño sistema TABS-PCM: suelo radiante convencional con el PCM embebido en la placa de mortero	2 (2.2.1)
3) Importancia del trabajo relacionado con el diseño y el análisis previo de sistemas TABS-PCM	3-E) Diseño y dimensionamiento de una instalación experimental	7

Tabla 2. 1. Enumeración de los objetivos -y relación con las principales conclusiones extraídas del estado del arte- que atañen al diseño de una instalación experimental para la evaluación del funcionamiento de elementos termoactivos con PCM.

2.2.2. Determinación de propiedades y análisis de características de los materiales

En la tabla 2.2 se recogen los objetivos específicos de la tesis ligados a la determinación de propiedades y evaluación de características de los materiales de construcción compuestos con PCM. Dentro del ámbito de la determinación de propiedades, se ha contado principalmente con los equipos y dispositivos experimentales disponibles en el laboratorio de determinación de propiedades del grupo GITSE. Teniendo en cuenta el

grado de heterogeneidad de los materiales granulados con PCM utilizados, se ha propuesto la metodología T-history para la determinación de la curva entalpía-temperatura.

Pese a que existen trabajos que muestran la exactitud de distintas instalaciones experimentales basadas en este método, no se ha realizado hasta ahora una cuantificación sistemática de la influencia de algunas fuentes de error que afectan sobre el mismo. Dadas las características particulares de la aplicación del procedimiento experimental a la caracterización de materiales sólidos, se propone, por una parte, la elaboración del análisis previo de dos de las principales fuentes de error que pueden influir en el método T-history y, por otra parte, la realización de medidas complementarias que permitan contrastar los resultados obtenidos.

En la etapa previa de análisis, se ha considerado relevante el estudio de la influencia en las medidas del método de los gradientes radiales de temperatura en las muestras. Además, se propone el desarrollo de un método que permita evaluar la propagación de incertidumbre a través de los métodos de análisis (como el desarrollado por Marín et al. 2003) que, mediante la integración numérica de los datos empíricos, permiten la determinación de la curva entalpía-temperatura.

En segundo lugar, se propone la realización de medidas complementarias de la variación de entalpía, basadas en el estudio experimental del balance de energía en el intercambio de calor entre un lecho de material granulado y el aire, de tal manera que se pueda establecer una intercomparación con las medidas del método T-history.

Además, se establece el objetivo de determinar el resto de propiedades (λ , ρ y c_p) de los materiales compuestos de construcción y PCM analizados en este trabajo. Se evaluará la influencia del contenido del PCM en dichas propiedades y, en todos los casos, se realizará una evaluación del intervalo de incertidumbre asociado a las medidas.

Por último, se considera necesario llevar a cabo una primera evaluación del comportamiento frente al fuego de los materiales utilizados, ya que éste puede constituir uno de los aspectos más críticos para su incorporación en los edificios.

Conclusiones del estado del arte	Objetivos	Capítulo
1) Principal problemática en la determinación de la curva h-T de materiales compuestos: tamaño de muestra / representatividad	1-P) Aplicación del método T-history para la medida de la curva h-T de compuestos de PCM granulados	3
2) T-history. Se desconoce la influencia exacta entre los gradientes de temperatura en las muestras. No se han desarrollado un método que permita la asignación de la incertidumbre asociada a cada punto de la curva h-T	2-P) Estudio teórico de los efectos de las siguientes fuentes de error: 2.1-P) Gradientes térmicos radiales 2.2-P) Desviaciones en la medida de temperatura de las sondas 2.3-P) Comparación con los resultados de un procedimiento experimental alternativo	3 (3.2) (3.3) (3.5)
3) No existen medidas de referencia o modelos generales que permitan determinar las propiedades de un compuesto de mortero y PCM	3-P) Determinación de las propiedades termofísicas (ρ , λ , c_p) del compuesto de mortero y PCM. 3.1-P) Evaluación de la influencia del contenido en PCM en las propiedades 3.2-P) Evaluación del intervalo de incertidumbre asociado a las medidas experimentales	4 (4.3-4.5) (4.6)

4) Comportamiento al fuego: -PCM orgánico: degrada esta característica de los materiales de construcción a los que se incorpora -dicho deterioro depende del tipo de compuesto y del contenido en PCM	4-P) Estudio del comportamiento al fuego de los materiales propuestos 4.1-P) Estudio de la influencia del contenido en PCM	4 (4.8) (4.8)
---	---	------------------

Tabla 2. 2. Enumeración de los objetivos -y relación con las principales conclusiones extraídas del estado del arte- que atañen a la determinación de propiedades y análisis de características de los materiales utilizados

2.2.3. Simulación numérica

Se propone la evaluación numérica del elemento de construcción activo con PCM, integrada en un modelo global de simulación energética del edificio, como una herramienta fundamental para el diseño y análisis del funcionamiento de estos sistemas.

La escasez de modelos que permitan integrar el cálculo de elementos de construcción activos con PCM en los programas de simulación energética de edificios, ha motivado la necesidad de desarrollar un modelo propio para la evaluación del comportamiento térmico de dichos sistemas de manera conjunta con el resto de componentes de la construcción. Se propone, además, contrastar la fiabilidad de estas herramientas numéricas por medio de su intercomparación; bien a través de metodologías ampliamente aceptadas dentro del ámbito de la simulación energética de edificios (BESTEST, Judkoff y Neymark, 1995), o bien mediante la comparación con modelos más detallados de transferencia de calor.

Finalmente, se ha aplicado un estudio sistemático sobre los modelos que permite el análisis de sensibilidad y de propagación de incertidumbres, de tal manera que es posible evaluar el efecto de las desviaciones asociadas a la determinación de propiedades sobre los resultados numéricos.

Conclusiones del estado del arte	Objetivos	Capítulo
1) Estudio numérico TABS-PCM: recomendable integrado dentro del edificio	1-S) Simulación del elemento TABS de forma integrada con el resto del cubículo experimental	5
2) Escasez de modelos específicos PCM-TABS en los programas de simulación energética de edificios	2-S) Desarrollo de herramientas de simulación: 2.1-S) TABS-PCM 2.2-S) Edificio	5 (5.1) (5.3)
3) Importancia de documentar el trabajo realizado sobre la validación de los modelos	3-S) Verificación e intercomparación de los modelos	5 (5.2-3)
4) Incertidumbre apreciable asociada a la determinación de las propiedades termofísicas de los materiales compuestos con PCM	4-S) Estudio propagación incertidumbres	6
5) Disparidad en los resultados presentados hasta el momento sobre el funcionamiento de los sistemas TABS-PCM	5-S) Estudio numérico del comportamiento térmico TABS-PCM en una instalación experimental	7

Tabla 2. 3. Enumeración de los objetivos -y relación con las principales conclusiones extraídas del estado del arte- relacionados con la simulación de elementos termoactivos con PCM.

Capítulo 3. Determinación de la curva entalpía-temperatura mediante el método T-history

3.1. Introducción

Este capítulo se dedica a la determinación de la curva entalpía-temperatura, mediante el método T-history, de los materiales seleccionados para la conformación de un compuesto con el mortero de suelo radiante. En primer lugar, se ha llevado a cabo un análisis teórico de la transferencia de calor en las muestras utilizadas en este procedimiento experimental, con el objetivo de cuantificar su influencia en la desviación de las medidas (sección 3.2). El estudio está motivado, entre otros aspectos, por las conclusiones del trabajo de Hong et al. (2004), en las que se señala la apreciable repercusión de los gradientes térmicos en los resultados del método y, en consecuencia, se reclama la necesidad de acometer un análisis teórico de estos efectos.

Seguidamente, se propone y desarrolla un método para el cálculo de la propagación de incertidumbres, en el que se tienen en cuenta los posibles errores de medida de las sondas de temperatura (sección 3.3). El análisis se ha aplicado al procedimiento propuesto por Marín et al. (2003) para la determinación de la curva entalpía-temperatura a partir de los datos experimentales.

Mediante la realización de los ensayos T-history de fusión y solidificación a los materiales seleccionados para la aplicación de suelo radiante, se han obtenido sus respectivas curvas entalpía-temperatura (sección 3.4), necesarias para los posteriores análisis teóricos. Además, a través de este procedimiento, se han podido evaluar otros aspectos importantes que condicionan la selección del PCM, tales como los fenómenos de subenfriamiento e histéresis o el deterioro de la capacidad de almacenamiento tras la experimentación de sucesivos ciclos de fusión y solidificación.

Finalmente, se propone una medida complementaria de la variación de entalpía, basada en el análisis del balance de energía a una corriente de aire que intercambia calor con un lecho de partículas de material compuesto con PCM (sección 3.5). El objetivo de esta medida adicional es establecer una comparación con las medidas obtenidas en la instalación T-history.

3.2. Estudio de la influencia del gradiente térmico radial en la muestra

El propósito de esta sección es el análisis teórico de la influencia del gradiente térmico radial de la muestra sobre los resultados del método T-history. Como se afirma en el capítulo 1, este fenómeno puede constituir una de las principales fuentes de error en la determinación de la curva entalpía-temperatura (Hong et al. 2004). Además, en la experimentación con materiales sólido compuestos con PCM, es previsible que este efecto cobre mayor importancia debido a que, en estos casos, la transferencia de calor se produce únicamente por conducción.

Así pues, este análisis teórico se ha llevado a cabo a través de dos herramientas: en primer lugar, un modelo analítico ha permitido la estimación de las desviaciones producidas en la medida del calor específico; en segundo lugar, los efectos del cambio de fase se han estudiado mediante un modelo numérico. En ambos casos, se ha propuesto la aplicación del análisis dimensional de tal manera que sea posible generalizar los resultados sobre la relación entre los principales parámetros que caracterizan el ensayo y las desviaciones producidas por los gradientes térmicos.

3.2.1. Modelo general de transferencia de calor en las muestras

En este análisis se estudia la transferencia de calor por conducción radial en las muestras de método T-history. Estas muestras se diseñan con una relación de aspecto alta entre la longitud y el diámetro ($L/D > 15$, Zhang et al. 1999), de manera que puede despreciarse el efecto de la conducción del calor en la dirección axial. En algunos trabajos se ha comprobado experimentalmente que estos gradientes son despreciables (Hong et al. 2004, Rady et al. 2009).

De este modo, el problema de la transferencia de calor en las muestras puede formularse mediante el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales (Ec. 1-8). En este caso, el sistema de ecuaciones se corresponde a la muestra con PCM; se ha omitido la formulación análoga –sin contribución del calor latente– correspondiente a la sustancia utilizada como referencia.

$$\rho_{PCM} \cdot \left(c_{p,PCM} \cdot \frac{\partial T_{PCM}}{\partial t} + h_m \cdot \frac{\partial f}{\partial t} \right) = \frac{\lambda_{PCM}}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial T_{PCM}}{\partial r} \right) \quad 0 \leq r \leq R - e \quad \text{Ec. 1}$$

$$\frac{\partial T_{PCM}(r=0,t)}{\partial r} = 0 \quad \text{Ec. 2}$$

$$T_{PCM}(r = R - e, t) = T_t(r = R - e, t) \quad \text{Ec. 3}$$

$$\lambda_{PCM} \cdot \frac{\partial T_{PCM}}{\partial r} \Big|_{r=R-e} = \lambda_t \cdot \frac{\partial T_t}{\partial r} \Big|_{r=R-e} \quad \text{Ec. 4}$$

$$\rho_t \cdot c_{p,t} \cdot \frac{\partial T_t}{\partial t} = \frac{\lambda_t}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial T_t}{\partial r} \right) \quad R - e < r \leq R \quad \text{Ec. 5}$$

$$\lambda_t \cdot \frac{\partial T_t(R,t)}{\partial r} = h_{c-r} \cdot (T_\infty - T_t(R, t)) \quad \text{Ec. 6}$$

$$T_{PCM}(r, t = 0) = T_0 \quad 0 \leq r \leq R - e \quad \text{Ec. 7}$$

$$T_t(r, t = 0) = T_0 \quad R - e < r \leq R \quad \text{Ec. 8}$$

3.2.1.1. Análisis dimensional

Se ha aplicado el análisis dimensional con la finalidad de obtener una mayor generalización en el estudio de la repercusión de las condiciones de ensayo sobre los resultados del procedimiento experimental. Con la intención de simplificar este análisis – limitando el número de variables adimensionales-, se han adoptado algunas hipótesis adicionales: la conductividad de los materiales se ha considerado constante y no se ha contemplado la variación con la temperatura del coeficiente equivalente de transferencia de calor que combina los efectos de la radiación y la convección natural sobre la superficie de las muestras.

A partir del problema de transferencia de calor planteado (Ec. 1-8), se han definido los principales números adimensionales, que se muestran en la tabla 3.1. En ella, se presenta, además, el rango de variación (entre corchetes) considerado en el estudio para cada parámetro adimensional, de acuerdo con los valores habituales en los experimentos. Asimismo, se muestra entre paréntesis el valor de referencia correspondiente al caso que ha servido de base para este análisis. Es preciso señalar que en los análisis de este capítulo se ha optado por la definición del número de Biot que toma como longitud característica el radio de la probeta ($Bi=h \cdot R/\lambda$), tal y como proponen Hong et al. (2004).

Número adimensional	Rango de variación	Número adimensional	Rango de variación
$Bi_{ref} = \frac{h \cdot R}{\lambda_{ref}}$	[0-0,2] (0,05)	$Ste = \frac{c_{p,PCM} \cdot (T_{\infty} - T_m)}{h_m}$	[0,1-1] (0,3)
$C_{r,ref} = \frac{m_{ref} \cdot c_{p,ref}}{m_{ref} \cdot c_{p,ref} + m_t \cdot c_{p,t}}$	[0,5-0,9] (0,85)	$R_t/R_{c-r} = \frac{\lambda_t}{h \cdot e}$	[0-0,005] (0,003)
$Bi_{PCM} = \frac{h \cdot R}{\lambda_{PCM}}$	[0-0,2] (0,15)	$\theta_m = \frac{\Delta T_m}{2 \cdot (T_{\infty} - T_m)}$	[0,02-0,16] (0,08)
$C_{r,PCM} = \frac{m_{PCM} \cdot c_{p,PCM}}{m_{PCM} \cdot c_{p,PCM} + m_t \cdot c_{p,t}}$	[0,5-0,9] (0,7)	$\theta_e = \frac{T_{\infty} - T_m}{T_{\infty} - T_0}$	[0,3-0,7] (0,06)

Tabla 3. 1. Definición de las principales variables adimensionales asociadas al problema definido.

3.2.2. Modelo analítico: cálculo de la desviación en la medida del calor específico

En esta sección se plantea el modelo analítico mediante el que se obtiene una estimación de la desviación en la medida del calor específico de la sustancia que se ensaya (s)¹¹. Este modelo analítico presenta dos simplificaciones adicionales:

- no se considera el proceso de cambio de fase
- se asume el comportamiento del portamuestras o recipiente (t) como sistema de capacidad. Esta hipótesis es aceptable si la resistencia térmica de este componente es despreciable $h_{c-r} \ll \frac{\lambda_t}{e}$ y su dinámica considerablemente más rápida que la de las sustancias que se ensayan $\frac{\lambda_s}{\rho_s \cdot c_{p,s} \cdot (R-e)^2} \ll$

$$\frac{\lambda_t}{\rho_c \cdot c_{p,t} \cdot e^2}, \frac{\lambda_{ref}}{\rho_{ref} \cdot c_{p,ref} \cdot (R-e)^2} \ll \frac{\lambda_t}{\rho_c \cdot c_{p,t} \cdot e^2}.$$

¹¹ En este caso, en el que no se considera el cambio de fase, se designa en las ecuaciones con el subíndice “s” del inglés *sample*.

Al ser adoptado el modelo de sistema de capacidad para representar el comportamiento del portamuestras, el sistema de ecuaciones diferenciales anterior (Ec. 1-8) queda reducido a una sola ecuación diferencial en derivadas parciales (Ec. 9-11).

$$\rho_s \cdot c_{p,s} \cdot \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\lambda_s}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial T_s}{\partial r} \right) \quad 0 \leq r \leq R - e \quad \text{Ec. 9}$$

$$-\lambda_t \cdot \frac{\partial T_s(R-e,t)}{\partial r} + h \cdot \frac{R}{R-e} (T_\infty - T_s(R-e,t)) = \frac{m_t \cdot c_{p,t}}{2 \cdot \pi \cdot (R-e)} \cdot \frac{\partial T_s(R-e,t)}{\partial t} \quad \text{Ec. 10}$$

$$T_s(r, t = 0) = T_0 \quad \text{Ec.11}$$

En relación al problema clásico de transferencia de calor transitoria unidimensional en geometría cilíndrica (Incropera et al. 2007), el modelo introduce, en la condición de contorno (Ec. 10), la inercia térmica adicional asociada a la masa del portamuestras. De este modo, se obtiene la una solución general idéntica (Ec. 12), que se expresa en forma de serie de funciones. Esta suma converge rápidamente en el primer término, correspondiente con la dinámica dominante del sistema térmico. Así pues, durante la mayor parte del ensayo (a partir del instante $t = 0,2 \cdot \frac{\rho \cdot c_{p,s} \cdot (R-e)^2}{\lambda_s}$) la evolución temporal de la distribución de temperaturas en las muestras se puede aproximar con exactitud mediante este primer sumando (Ec. 13).

$$T(r, t) = T_\infty - (T_\infty - T_0) \cdot \sum_{i=1}^{\infty} C_i \cdot J_0 \left(\frac{\xi_i \cdot r}{R-e} \right) \cdot e^{-\frac{\xi_i^2 \cdot \lambda_s}{\rho \cdot c_{p,s} \cdot (R-e)^2} t} \quad \text{Ec. 12}$$

$$T(r, t) \approx T_\infty - (T_\infty - T_0) \cdot C_1 \cdot J_0 \left(\frac{\xi_1 \cdot r}{R-e} \right) \cdot e^{-\frac{\xi_1^2 \cdot \lambda_s}{\rho \cdot c_{p,s} \cdot (R-e)^2} t} \quad t > 0,2 \cdot \frac{\rho \cdot c_{p,s} \cdot (R-e)^2}{\lambda_s} \quad \text{Ec. 13}$$

Los valores propios, ξ_i , son las soluciones de ecuación trascendente (Ec. 14) que surge a partir de la aplicación de la condición de contorno sobre la superficie. En este caso, aparece en la expresión el término adicional vinculado a la masa térmica del portamuestras ($m_t \cdot c_{p,t}$).

$$2 \cdot \frac{J_1(\xi_i) \cdot \xi_i}{J_0(\xi_i)} + \xi_i^2 \cdot \frac{m_t \cdot c_{p,t}}{m_s \cdot c_{p,s}} = 2 \cdot Bi \quad \text{Ec. 14}$$

En las condiciones habituales de los ensayos T-history, caracterizados por sus bajos números de Biot, se puede admitir la aproximación basada en el truncamiento de las funciones de Bessel de primera especie hasta el segundo orden. De este modo, se obtiene la siguiente aproximación para el primer valor propio (Ec. 15):

$$\xi_1^2 \approx \frac{2 \cdot Bi}{\left(1 + \frac{m_t \cdot c_{p,t}}{m_s \cdot c_{p,s}}\right)} = 2 \cdot Bi \cdot C_{r,s} \quad \text{Ec. 15}$$

Donde $C_{r,s}$ es el número adimensional, definido en la tabla 3.1, asociado a la relación entre la masa térmica de la muestra y del recipiente.

Una vez obtenida esta aproximación de la solución analítica para bajos números de Biot, es posible trasladarla a las ecuaciones que emplea el método T-history. La siguiente ecuación (Ec. 16) se corresponde con el balance de energía exacto, planteado en forma diferencial, aplicado sobre la muestra que se analiza (s). Moreno-Alvarez et al. (2010) propusieron una formulación similar, basada en el análisis infinitesimal de la evolución de las temperaturas, para el tratamiento de estos datos experimentales.

$$C_s \cdot \frac{d\bar{T}_s}{dt} + C_t \cdot \frac{d\bar{T}_t}{dt} = h_{c-r} \cdot A \cdot (T_\infty - T_{sup}) \quad \text{Ec. 16}$$

En este balance de energía exacto intervienen tanto las temperaturas promedio de la sustancia y su recipiente (\bar{T}_s , \bar{T}_t), como la superficial del este último elemento (T_{sup}). Sin embargo, en las instalaciones experimentales reales sólo se tiene, de manera habitual, una medida de la temperatura de un punto: bien en el centro de la muestra (Zhang et al. 1999, Hong et al. 2004, Sandnes et al. 2006, Lázaro 2008, Rady et al. 2009) o bien sobre la superficie (Lázaro et al. 2006, Hiebler 2007, Stankovic y Kyriacou 2013). Se puede definir, por tanto, el siguiente error relativo entre la temperatura medida (T_{ms}) y la correspondiente a cada término de la ecuación del balance de energía (T_i) (Ec. 17).

$$e_{T_i} = \frac{T_{ms} - T_i}{T_\infty - T_{ms}} \quad \text{Ec. 17}$$

En este modelo simplificado, en el que se ha asumido el comportamiento del recipiente como sistema de capacidad -y, por tanto, su temperatura media y superficial son idénticas- sólo es necesario definir dos desviaciones en la medida de las temperaturas: las asociadas a la temperatura media de cada muestra $e_{\bar{T}}$ (Ec. 18) y a la temperatura superficial $e_{T_{sup}}$ (Ec. 19). A partir de la solución aproximada del modelo (Ec. 13), se pueden obtener expresiones sencillas para estos errores. En este caso, se muestran las desviaciones resultantes si se mide la temperatura en el centro de la muestra (Ec. 18-19).

$$1 + e_{\bar{T}} = \frac{T_\infty - \bar{T}_s}{T_\infty - T_{ms}} = \frac{(T_\infty - T_0) \cdot C_1 \cdot \int_{r^*=0}^{r^*=1} 2 \cdot r^* \cdot J_0(\xi_1 \cdot r^*) \cdot dr^*}{(T_\infty - T_0) \cdot C_1} = 2 \cdot \frac{J_1(\xi_1)}{\xi_1} \approx 1 - \frac{\xi_1^2}{8} = 1 - \frac{Bi}{4} \cdot C_r \quad \text{Ec. 18}$$

$$1 + e_{T_{sup}} = \frac{T_\infty - T_{sur}}{T_\infty - T_{ms}} = \frac{(T_\infty - T_0) \cdot C_1 \cdot J_0(\xi_1)}{(T_\infty - T_0) \cdot C_1} = J_0(\xi_1) \approx 1 - \frac{\xi_1^2}{4} = 1 - \frac{Bi}{2} \cdot C_r \quad \text{Ec. 19}$$

La ecuación exacta del balance de energía (Ec. 20) puede ahora expresarse utilizando la temperatura medida y las desviaciones relativas que se han definido (Ec. 18, 19).

$$C_s \cdot \frac{dT_{ms}}{dt} \cdot (1 + e_{\bar{T}}) + C_t \cdot \frac{dT_{ms}}{dt} \cdot (1 + e_{T_{sup}}) = \bar{h} \cdot A \cdot (T_{\infty} - T_{ms}) \cdot (1 + e_{T_{sup}}) \quad Ec. 20$$

A partir del balance de energía correspondiente a cada sustancia, es posible plantear las ecuaciones que permiten despejar la capacidad térmica del material que se pretende caracterizar. La ecuación 21 representa la aproximación (\hat{C}_s) en la que se basa el método -asumiendo una temperatura uniforme en ambas muestras-, mientras que la ecuación 22 proporciona una estimación exacta del calor específico (C_s) al tener en cuenta el gradiente térmico presente en ambos materiales.

$$\hat{C}_s + C_t = (C_{ref} + C_t) \cdot \frac{\int (T_{\infty} - T_{ms,s}) \cdot dt}{\int (T_{\infty} - T_{ms,ref}) \cdot dt} = (C_{ref} + C_t) \cdot \frac{\hat{I}'_s}{\hat{I}'_{ref}} \quad Ec. 21$$

$$C_s \cdot (1 + e_{\bar{T},s}) + C_t \cdot (1 + e_{sup,s}) = \left[C_{ref} \cdot (1 + e_{\bar{T},ref}) + C_t \cdot (1 + e_{T_{sup},ref}) \right] \cdot \frac{\hat{I}'_s}{\hat{I}'_{ref}} \cdot \frac{1 + e_{q,s}}{1 + e_{T_{sur},ref}} \quad Ec. 22$$

La siguiente relación, r_e (Ec. 23), entre la desviación relativa en la estimación de la temperatura promedio y la superficial, resulta útil en el desarrollo de las expresiones que seguirán más adelante. Es preciso destacar que, si se asume el modelo propuesto, esta relación es la misma tanto si la temperatura se mide en el centro como en la superficie de la muestra.

$$r_e = \frac{1 + e_{\bar{T}}}{1 + e_{T_{sup}}} \approx \frac{1 - \frac{Bi}{4} \cdot C_r}{1 - \frac{Bi}{2} \cdot C_r} \quad Ec. 23$$

Una vez planteada la formulación aproximada y exacta del método (Ec. 21 y 22), interesa trabajar ambas expresiones para obtener una ecuación que permita calcular de forma directa la desviación producida en la estimación de la capacidad térmica (e_{cp}) (Ec. 24) a partir los principales parámetros del ensayo. Así pues, en un primer paso, dividiendo ambas expresiones (Ec. 21 y 22) es posible eliminar la relación entre las integrales temporales del salto de temperaturas medido entre las muestras y el ambiente ($\hat{I}'_{ref}/\hat{I}'_s$) (Ec. 25). El cociente entre las dos formulaciones -Ec. 21 y 22- puede expresarse en función

de las relaciones definidas (r_e , e_{cp}) y de los números adimensionales presentados en la tabla 3.1 con el objetivo de obtener una expresión más compacta (Ec. 26).

$$e_{cp} = \frac{\hat{C}_s - C_s}{C_s} \quad \text{Ec. 24}$$

$$\frac{\hat{C}_s + C_c}{C_s \cdot r_{e,s} + C_c} = \frac{C_{ref} + C_c}{C_{ref} \cdot r_{e,ref} + C_c} \quad \text{Ec. 25}$$

$$\frac{e_{cp} \cdot C_{r,s} + 1}{C_s \cdot (r_{e,s} - 1) + 1} = \frac{1}{C_{ref} \cdot (r_{e,ref} - 1) + 1} \quad \text{Ec. 26}$$

A continuación, se puede despejar de la ecuación 26 el error relativo en la medida del calor específico, obteniendo la siguiente expresión (Ec. 27):

$$e_{cp} = \frac{C_s \cdot (r_{e,s} - 1) - C_{ref} \cdot (r_{e,ref} - 1)}{C_s \cdot [C_{ref} \cdot (r_{e,ref} - 1) + 1]} \quad \text{Ec. 27}$$

Finalmente, utilizando la aproximación correspondiente a los términos de primer orden del desarrollo en serie de Taylor de la ecuación 27 a partir de las respectivas variables producto $Bi \cdot C_{r,i}$ –correspondientes a la referencia (ref) y a sustancia analizada (s)-, se obtiene la siguiente expresión sencilla para calcular la desviación en la medida del calor específico que proporciona el método T-history (Ec. 28).

$$e_{cp,s} \approx \frac{1}{4} \cdot \left(C_{r,s} \cdot Bi_s - \frac{C_{r,ref}^2}{C_{r,s}} Bi_{ref} \right) \quad \text{Ec. 28}$$

La ecuación 28 resulta útil ya que relaciona las desviaciones esperables con los principales parámetros que caracterizan el ensayo. Aunque tradicionalmente se ha reconocido la relevancia del número de Biot en los resultados del método, hasta el momento no se han presentado ecuaciones que asocien esta variable adimensional con la exactitud de la medida. Como se observa, la principal contribución a esta desviación sistemática es la diferencia entre los números de Biot de las sustancias –ensayada y referencia. Es preciso aclarar que, aunque la capacidad térmica relativa de cada sustancia, C_r , también aparece en la ecuación, su influencia es secundaria, ya que su rango de variación es menor. Además, pese a que la fórmula predice una disminución del error según se reduce el valor de estas relaciones ($C_{r,ref}$, $C_{r,s}$), hay que tener en cuenta que ésta implicaría la pérdida de sensibilidad en el método experimental y, tal como predice el modelo de propagación de incertidumbres desarrollado en el apartado 3.3 del capítulo, la amplificación de la incertidumbre en la medida. Por otro lado, el modelo en el que está basada la estimación del error, que considera el recipiente como sistema de capacidad puro, se aleja de la realidad conforme disminuye la

capacidad térmica relativa de las muestras. Así pues, teniendo en cuenta la ecuación 28, la desviación máxima que se puede obtener si se adopta la condición menos restrictiva establecida para el método, $Bi=h \cdot R/(2 \cdot \lambda)=0,1$, es aproximadamente del 5%.

3.2.3. Efecto del cambio de fase: análisis a través de un modelo numérico

Dado que no existe una solución analítica para el problema de transferencia de calor que se plantea en la sección 3.2.1, ha sido desarrollada una herramienta de simulación para estudiar los efectos de la transferencia de calor en la muestra, de una manera análoga a la del apartado anterior (sección 3.2.2), durante el proceso de cambio de fase. El modelo numérico ha sido implementado por medio de un esquema de diferencias finitas con mallado espacial uniforme, en el que se ha utilizado una distancia entre nodos de 0,2mm y un incremento temporal de 10s. El cambio de fase se ha tratado mediante el método de la entalpía. El sistema de ecuaciones resultante se ha implementado en el programa EES (Klein 2003).

3.2.3.1. Identificación de los errores

Con el objetivo de facilitar el análisis, se ha utilizado una curva entalpía-temperatura definida por una función analítica (Ec. 29), en la que se pueden identificar los principales parámetros que se estudian: calor específico (c_p), entalpía de cambio de fase (h_m) y temperatura de cambio de fase (T_m). Palomo del Barrio y Dauvergne (2011) utilizaron la misma expresión analítica en su estudio numérico previo aplicado al nuevo dispositivo experimental que propusieron para la caracterización de PCM. En este caso, se ha excluido del análisis de las desviaciones el parámetro ligado a la amplitud del rango de temperaturas (ΔT_m) en el que tiene lugar este proceso de transición.

$$h(T) = h(T_0) + c_p \cdot (T - T_0) + \frac{1}{2} \cdot h_m \cdot \left[1 + \tanh\left(\frac{4 \cdot (T - T_m)}{\Delta T_m}\right) \right] \quad Ec. 29$$

Los resultados numéricos -correspondientes a la evolución temporal de las temperaturas en ambas muestras- se tratan siguiendo la metodología propuesta por Marín et al. (2003). En la implementación de este algoritmo de integración se ha utilizado un incremento de temperatura constante ($\Delta T_{int}=0,1^\circ\text{C}$), menor que el intervalo de temperaturas de cambio de fase ($\Delta T_i/\Delta T_m \leq 3\%$) y cinco órdenes de magnitud superior a la precisión de la temperatura calculada por el método numérico. Se ha analizado y controlado el efecto de este incremento de temperatura en la precisión de los cálculos mediante la comparación, para todos los casos simulados, de la curva entalpía-temperatura integrada a partir de la formulación exacta del balance de energía para cada muestra (Ec. 16) con respecto a la función analítica original. Se ha demostrado que la desviación producida por el algoritmo numérico de integración es inapreciable; en todos los casos el error en la entalpía calculada es menor al 0,001%, mientras que el asociado a la temperatura media de cambio de fase es inferior a $0,001^\circ\text{C}$.

A partir de los resultados de cada simulación, se compara la curva entalpía-temperatura obtenida $\hat{h}(T)$ con la original $h(T)$, de manera que se puedan calcular las desviaciones en los tres parámetros definidos (c_p , h_m y T_m). En este análisis se han evaluado las desviaciones producidas tanto si la temperatura de las muestras se mide en el centro como sobre su superficie. En la figura 3.1, se muestra un ejemplo de esta comparación entre las dos curvas. En ella, se identifican de forma gráfica los mencionados parámetros. A su vez, las ecuaciones 30, 31 y 32 definen las nuevas desviaciones consideradas en esta sección relacionadas con el proceso de cambio de fase. Debido a que, con respecto a la función analítica, la forma de la curva calculada varía ligeramente en el entorno de esta transición, la desviación en la temperatura de cambio de fase se promedia mediante la ecuación 31.

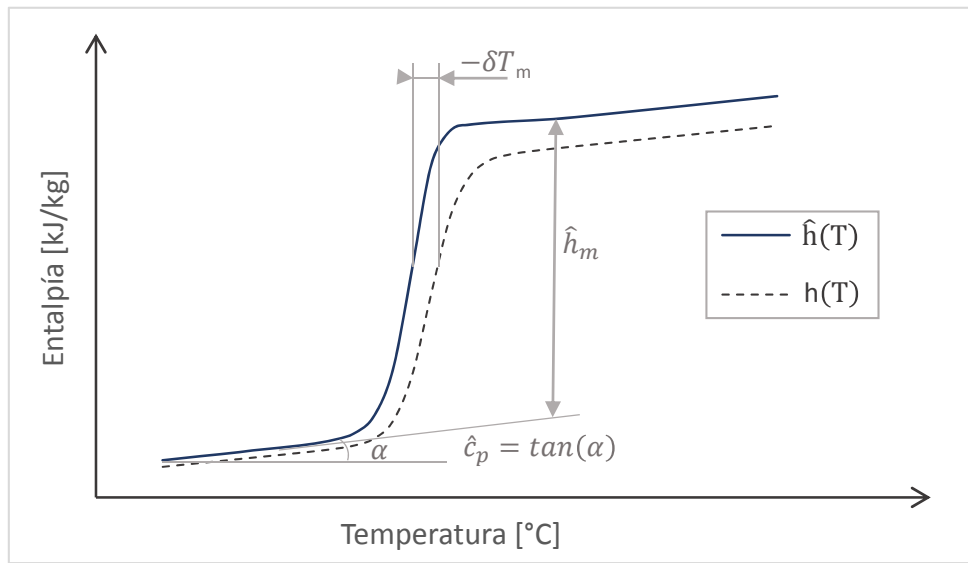


Fig. 3. 1. Interpretación gráfica de los parámetros analizados.

$$e_{h_m} = \frac{\hat{h}_m - h_m}{h_m} \quad \text{Ec. 30}$$

$$\delta T_m = \frac{\int_{f=0,1}^{f=0,9} (\hat{T}_{PCM}(f) - T_{PCM}(f)) \cdot df}{0,8} \quad \text{Ec. 31}$$

$$e_{\delta T_m} = \frac{|T_{\infty} - T_m| \cdot \delta T_m}{(T_{\infty} - T_m)^2} \quad \text{Ec. 32}$$

3.2.3.2. Análisis de los resultados

3.2.3.2a. Análisis paramétrico

Se ha realizado un primer análisis paramétrico con la finalidad de identificar las variables adimensionales que influyen en las desviaciones calculadas sobre los parámetros

señalados en la sección 3.2.3.1 (c_p , h_m , T_m). En este primer análisis, se ha partido del caso base definido en la tabla 3.1 y se ha variado de forma independiente cada número adimensional dentro de su rango de valores habitual en los experimentos (reflejado en la misma tabla 3.1). En las figuras 3.2 y 3.3 se muestra la influencia de cada variable en los errores.

En relación a los resultados obtenidos, es preciso señalar que tal y como predice el modelo analítico, la desviación en la medida del calor específico calculada es idéntica si la temperatura se mide en la superficie o en el centro de la muestra. Por otro lado, se pueden identificar los números de Biot y la capacidad térmica relativa de cada sustancia ($C_{r,i}$) como los más influyentes en la desviación producida en el calor específico y la entalpía de cambio de fase (si ésta se estima a partir de la medida de la temperatura en el centro de la muestra). Sin embargo, cuando la temperatura se mide sobre la superficie de las muestras, no se observa una influencia apreciable de estas variables asociadas al PCM (Bi_{PCM} , $C_{r,PCM}$) en la desviación de la entalpía de cambio de fase. En el caso de la estimación de la temperatura de cambio de fase, se observa sólo la dependencia principal de los números adimensionales relacionados con el PCM (Bi_{PCM} , θ_m).

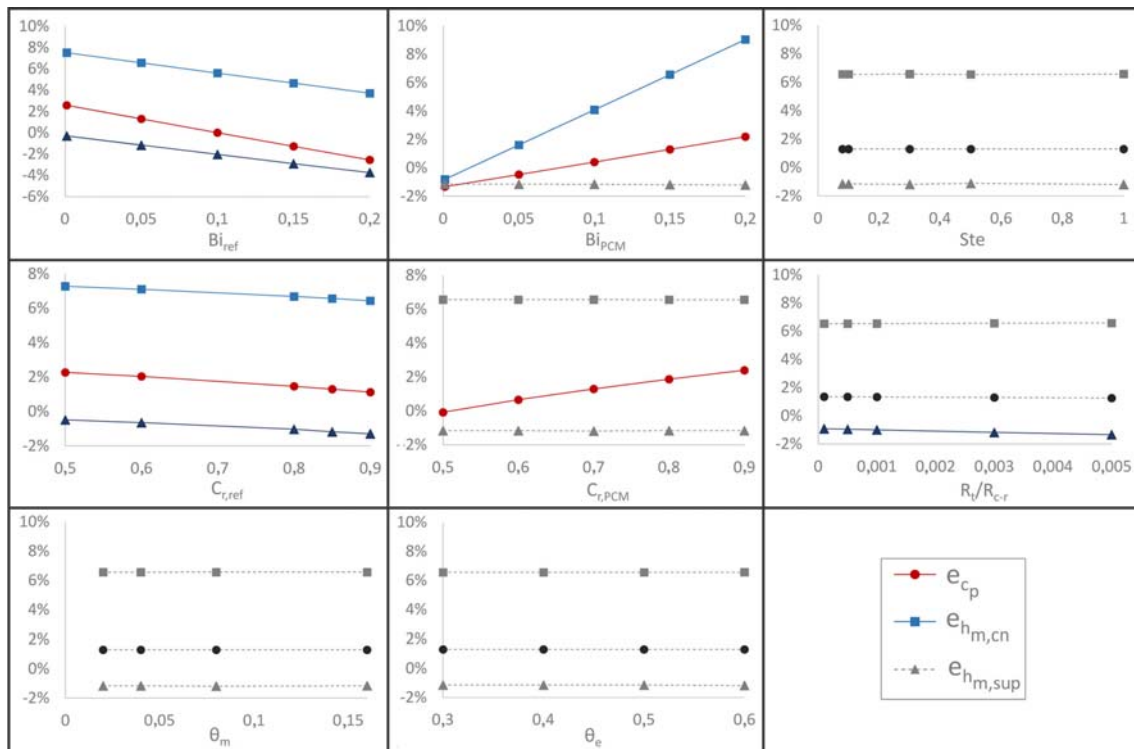


Fig. 3. 2. Análisis paramétrico: influencia de los números adimensionales en la desviación de las medidas de c_p y h_m . (cn: medida de la temperatura en el centro de la muestra; sur: medida sobre la superficie del tubo)

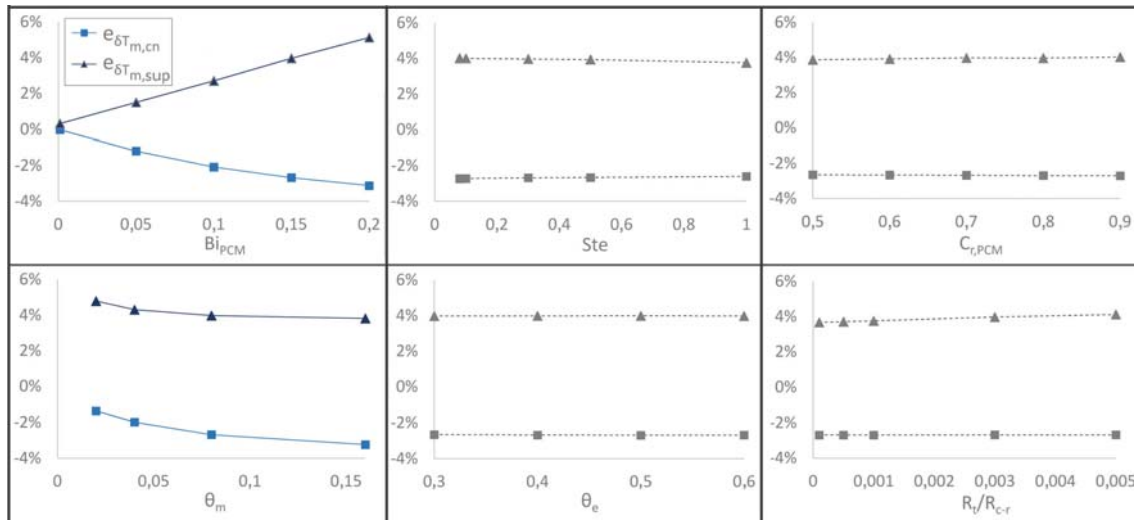


Fig. 3. Análisis paramétrico: influencia en la desviación causada en el cálculo de T_m . (cn: medida de la temperatura en el centro de la muestra; sur: medida sobre la superficie del tubo)

3.2.3.2b. Estudio de la interacción entre las variables adimensionales

A partir de la identificación de las variables que influyen en los errores del método, obtenida a partir del análisis paramétrico anterior, se ha realizado un estudio de la interacción entre estas variables. En primer lugar, se ha analizado la evolución de los errores en la estimación del calor específico y la entalpía de cambio de fase sobre distintas combinaciones de las variables adimensionales Bi_{PCM} , $C_{r,PCM}$, Bi_{ref} , $C_{r,ref}$. En el caso del error en la medida de la entalpía de cambio de fase cuando se mide la temperatura sobre la superficie de la muestra, se ha considerado además la variación del parámetro adimensional relativo a la resistencia térmica del recipiente (R_t/R_{c-r}). A partir de estos resultados ha sido posible obtener correlaciones entre los errores y las variables adimensionales que se adaptan con exactitud ($RMSD < 0,15\%$), como muestra la figura 3.4.

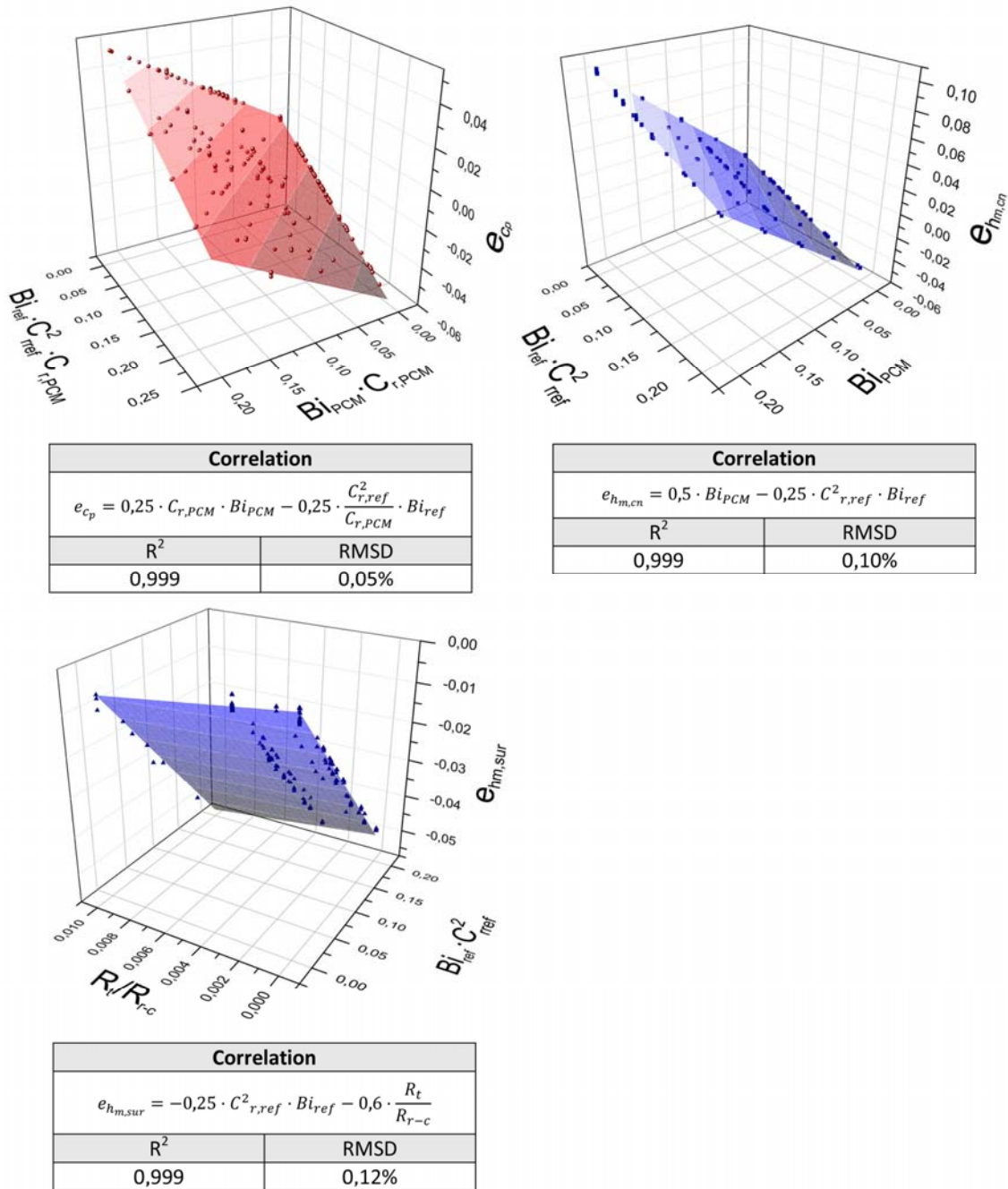


Fig. 3. 4. Correlaciones obtenidas para las desviaciones en el cálculo de c_p y h_m .

Si se observan las correlaciones extraídas, es preciso destacar que la relacionada con la desviación en la medida del calor específico coincide exactamente con la que predice el modelo analítico. Por otro lado, teniendo en cuenta la correlación para el error en la entalpía de cambio de fase si la temperatura se mide en el centro, se evidencia una mayor influencia del número de Biot de la sustancia (Bi_{PCM}) en relación a la fórmula obtenida para el error en el calor específico. De acuerdo con la predicción de este modelo, los errores en esta medida pueden llegar hasta el 10% si se ensayan materiales con el número de Biot límite menos restrictivo de los tradicionalmente utilizados en el método T-history ($Bi=h \cdot R/(2 \cdot \lambda)=0,1$).

El análisis de la dependencia de la desviación de la temperatura de cambio de fase muestra unas relaciones más complejas, tal y como se observa en la figura 3.5. Debido a esta razón, se ha optado por la determinación de relaciones simples que permitan acotar este error en lugar de la búsqueda de correlaciones más complicadas que se adapten a los datos obtenidos. Estas relaciones más sencillas se representan gráficamente en la figura 3.5 con trazo discontinuo en el plano $Bi_{PCM} \cdot e_{\delta T_m}$ sobre el que se proyectan los puntos de las superficies. Se observa en la misma figura que, si se considera un ensayo de fusión, la temperatura de cambio de fase se subestima si la temperatura de la muestra se mide en el centro mientras que se obtiene un valor mayor si ésta se mide sobre la superficie. Además, si se ensayan materiales con una curva entalpía-temperatura más abrupta (propia de materiales puros, caracterizados por un valor bajo del intervalo de temperaturas adimensional θ_m) el error producido disminuye si se mide la temperatura en el centro mientras que aumenta el correspondiente a la medida de temperatura sobre la superficie. Las ecuaciones 33 y 34 sirven para acotar este error dentro del espacio de variables adimensionales utilizado para este análisis ($0 \leq Bi_{PCM} \leq 0,2$ y $0,02 \leq \theta_m \leq 0,16$).

$$-0,22 \cdot Bi_{PCM} \leq \frac{(T_{\infty} - T_m) \cdot \delta T_{m,c}}{|T_{\infty} - T_m|^2} \leq 0 \quad Ec. 33$$

$$0,22 \cdot Bi_{PCM} \leq \frac{(T_{\infty} - T_m) \cdot \delta T_{m,sup}}{|T_{\infty} - T_m|^2} \leq 0,35 \cdot Bi_{PCM} \quad Ec. 34$$

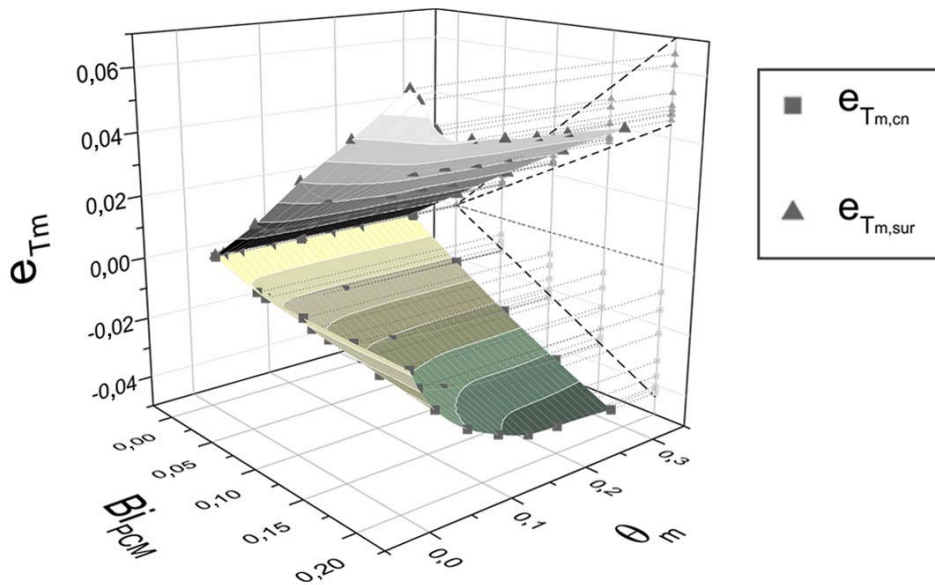


Fig. 3. 5. Influencia, para un ensayo de fusión, del número de Biot y la temperatura adimensional en la desviación de la temperatura de cambio de fase (Superficie superior: temperatura medida sobre la superficie de la muestra; superficie inferior: temperatura medida en el centro de la muestra)

3.2.3.2c. Análisis de las correlaciones extraídas. Extrapolación a una muestra del espacio completo de las variables adimensionales

En la sección anterior, se han encontrado correlaciones que se adaptan satisfactoriamente a los resultados obtenidos en el estudio de la interacción de las variables adimensionales influyentes identificadas en el primer análisis paramétrico. Sin embargo, dado que estas expresiones no se han obtenido sobre el espacio completo de variables adimensionales que caracterizan los ensayos y que, por tanto, algunas relaciones entre las variables han podido pasar desapercibidas, ha sido necesario probar la adecuación de las correlaciones sobre una muestra más representativa de dicho espacio completo.

Para este propósito, se han analizado las desviaciones producidas en un número amplio de casos de simulación conformado a partir de la muestra de las variables adimensionales de entrada obtenida a partir del método hipercubo latino (McKay et al. 2000). Este método se utiliza frecuentemente en los análisis de propagación de incertidumbres basados en el método Montecarlo. El algoritmo está descrito con detalle en el capítulo 6.

Así pues, se ha analizado la adecuación de las correlaciones sobre una muestra de 100 elementos del espacio de variables adimensionales definido en la tabla 3.1. Como se observa en la figura 3.6, la estimación que producen las correlaciones obtenidas sigue siendo satisfactoria (RSMD<0,15%).

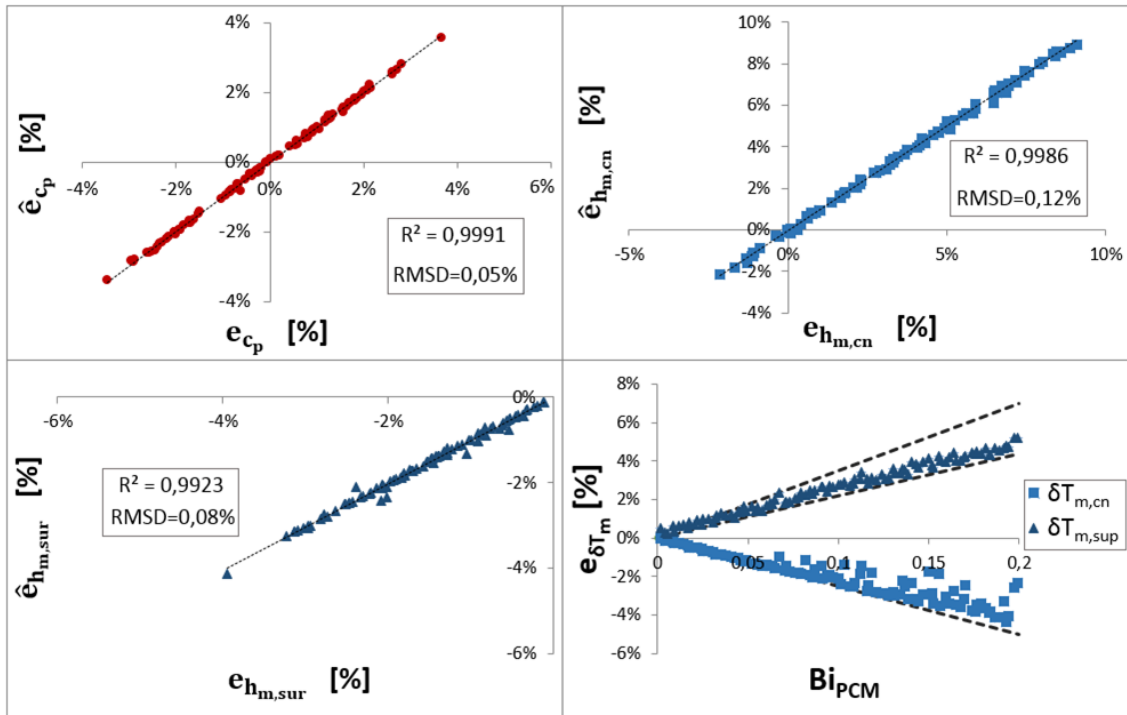


Fig. 3. 6. Comparación de la desviación estimada por las correlaciones (\hat{e}_x) y la obtenida a partir de los resultados de las simulaciones (e_x).

3.2.4. Discusión

El estudio ha permitido la cuantificación del error asociado a la estimación de los principales parámetros identificados en la curva entalpía temperatura (calor específico, entalpía de cambio de fase y temperatura de cambio de fase). En relación a la entalpía de cambio de fase, los errores calculados no son despreciables: aun cumpliéndose la condición menos restrictiva para el número de Biot ($Bi=h \cdot R/(2 \cdot \lambda)=0,1$, Zhang et al. 1999 y Rady et al. 2009) se puede llegar a sobreestimar esta magnitud hasta en un 10% si se mide la temperatura en el centro de la muestra. En el caso del calor específico estos errores son menos relevantes, llegando a un valor máximo del 5% dentro del rango de valores del número de Biot tradicionalmente aceptados.

Por otro lado, mediante el análisis paramétrico y la obtención de correlaciones se han podido identificar las variables adimensionales más influyentes en las desviaciones del método. De esta manera, los números de Biot de las muestras aparecen como las variables más relevantes. Aunque esta conclusión no es novedosa, pues ya la apuntan los criterios tradicionalmente utilizados para el método, la determinación de la relación entre estas variables y los errores producidos sí que resulta una aportación dentro del ámbito de investigación relacionado con la metodología T-history.

Otro aspecto importante, que habitualmente queda relegado a un segundo plano dentro de las conclusiones extraídas a partir de los análisis paramétricos, es la identificación de las variables que no influyen en las medidas. Esta información resulta interesante tanto para la determinación de las condiciones de los ensayos más favorables como para el análisis de las desviaciones observadas en la experimentación y el diagnóstico de sus posibles causas. En este sentido, es relevante destacar que el error en la estimación de la entalpía de cambio de fase no depende del salto térmico aplicado en el ensayo (θ_e, θ_m) ni de la relación entre el almacenamiento sensible y latente (número de Stefan).

Las correlaciones obtenidas se han contrastado en una amplia muestra del espacio definido por los valores frecuentes de los números adimensionales que definen los ensayos del método (reflejados en la tabla 3.1). Estas correlaciones producen una aproximación satisfactoria a los errores estimados a partir del modelo numérico ($R>0,99$; $RMSD<0,15\%$). Además, la predicción del error en la medida del calor específico a partir del modelo analítico coincide con la correlación extraída a partir del análisis numérico. Por otro lado, se han obtenido relaciones que permiten acotar el error en la medida de la temperatura de cambio de fase en función del número de Biot del PCM. En la tabla 3.2 se recogen las correlaciones y límites encontrados para estos errores.

Correlaciones	Acotación de los errores
$e_{c_p} = 0,5 \cdot C_{r,PCM} \cdot Bi_{PCM} - 0,25 \cdot \frac{C_{r,ref}^2}{C_{r,PCM}} \cdot Bi_{ref}$	
$e_{h_{m,cn}} = 0,5 \cdot Bi_{PCM} - 0,25 \cdot C_{r,ref}^2 \cdot Bi_{ref}$	$-0,22 \cdot Bi_{PCM} \leq \frac{(T_{\infty} - T_m) \cdot \delta T_{m,cn}}{ T_{\infty} - T_m ^2} \leq 0$
$e_{h_{m,sup}} = -0,25 \cdot C_{r,ref}^2 \cdot Bi_{ref} - 0,6 \cdot \frac{R_t}{R_{r-c}}$	$0,22 \cdot Bi_{PCM} \leq \frac{(T_{\infty} - T_m) \cdot \delta T_{m,sup}}{ T_{\infty} - T_m ^2} \leq 0,35 \cdot Bi_{PCM}$

Tabla 3. 2. Correlaciones y límites para los errores producidos en las medidas del método T-history.

Asimismo, estos resultados pueden ser útiles para selección del punto en el que se mide la temperatura de las muestras, a partir de la evaluación de los distintos efectos. En la tabla 3.3 se realiza, a modo de síntesis, una comparativa entre las consecuencias de la posición de las sondas de temperatura en las muestras. Aunque la medida de la temperatura sobre la superficie produce una mejor estimación de la entalpía de cambio de fase, presenta la desventaja de producir mayores desviaciones en la temperatura de cambio de fase, que se acentúan, además, conforme aumenta el salto térmico al que se somete la muestra.

Sin embargo, el aspecto más crítico de esta medida es su puesta en práctica en la instalación experimental. Es necesario asegurar un contacto térmico adecuado, de tal manera que las condiciones exteriores no perturben la medida. Desde este punto de vista, la colocación de la sonda de temperatura en el centro resulta más indicada si se utilizan sensores tipo PT-100 en los que la vaina de protección dificulta el mencionado contacto térmico. La realización de medidas exactas de la temperatura superficial implica la utilización de sensores que, además de asegurar un buen contacto térmico, no perturben la medida. En este sentido, Palomo del Barrio y Dauvergne (2011), que utilizaron termopares para este propósito, estimaron necesario realizar un estudio previo de la transferencia de calor local en el entorno del punto de medida para evaluar estas posibles desviaciones.

	Temperatura medida en el centro	Temperatura medida en la superficie
c_p	Misma desviación (hasta el 5% para $Bi=h \cdot R/(2 \cdot \lambda)=0,1$)	
h_m	Produce mayores desviaciones (hasta el 10% para $Bi=h \cdot R/(2 \cdot \lambda)=0,1$)	Produce, en general, menores desviaciones El error no depende de las propiedades del PCM
T_m		Produce mayores desviaciones, además éstas aumentan con el salto térmico ($T_\infty - T_m$)
Medida de la temperatura		Es preciso asegurar un buen contacto térmico de manera que las condiciones ambientales no perturben la medida

Tabla 3. 3. Comparativa entre las características de las medidas en el centro y la superficie de la muestra.

3.2.4.1. Aplicación de los resultados a un caso general

El análisis realizado ha permitido obtener fórmulas útiles que relacionan las condiciones de los ensayos con los errores que el método produce. No obstante, la generalización de estos resultados al caso de la experimentación con un PCM habitual, que no esté retenido dentro de una estructura de material sólido, debe hacerse con precaución. El modelo en el que se basa el análisis desprecia algunos efectos cuya relevancia debe ser analizada, tales como la convección natural en la fase líquida o el movimiento relativo de la fase sólida. Sin embargo, dado que estos efectos contribuyen a la transferencia de calor radial y por tanto tienden a reducir el gradiente térmico asociado, las correlaciones obtenidas pueden utilizarse como límites teóricos que acoten el error esperado en función de las condiciones de ensayo (tabla 3.4). De esta manera, pueden ser condebidas como una primera aproximación para el diseño de los portamuestras y la selección de las condiciones de ensayo más favorables.

	Temperatura medida en el centro	Temperatura medida sobre la superficie
c_p	$e_{c_p} \leq 0,25 \cdot C_{r,PCM} \cdot Bi_{PCM}$	$e_{c_p} \leq 0,25 \cdot C_{r,PCM} \cdot Bi_{PCM}$
h_m	$e_{h_m, cn} \leq 0,5 \cdot Bi_{PCM}$	-
T_m	$-0,22 \cdot Bi_{PCM} \leq \frac{(T_\infty - T_m) \cdot \delta T_{m, cn}}{ T_\infty - T_m ^2} \leq 0$	$0 \leq \frac{(T_\infty - T_m) \cdot \delta T_{m, sup}}{ T_\infty - T_m ^2} \leq 0,35 \cdot Bi_{PCM}$

Tabla 3. 4. Generalización de los resultados para el ensayo de PCM convencionales: obtención de límites teóricos para los errores.

3.3. Influencia del error de medida de las sondas de temperatura en los resultados del método T-history

El propósito de esta sección es obtener una expresión sencilla que permita calcular la incertidumbre, causada por los posibles errores de medida de las sondas de temperatura, asociada a los valores de entalpía que componen la curva determinada mediante el método de integración propuesto por Marín et al. (2003). Existe un acuerdo generalizado, entre los investigadores que han trabajado en el método T-history, acerca de la importancia de la exactitud en la medida de las sondas (p. ej. Zhang et al. 1999, Lázaro et al. 2008). Algunos autores (Zhang et al. 1999 y Rady et al. 2009) han proporcionado fórmulas para la estimación de la incertidumbre en el cálculo de la variación de entalpía, derivadas a partir de distintos métodos de integración o tratamiento de los datos experimentales. Sin embargo, las fórmulas presentadas hasta el momento no permiten la asignación del rango de incertidumbre a cada valor de entalpía de la curva. Por otro lado, en estos análisis previos, no se indentifica la sensibilidad del error frente a las distintas medidas de temperatura que se usan en el procedimiento experimental, correspondientes al PCM, la sustancia de referencia y el ambiente.

En consecuencia, se propone el desarrollo de un método simplificado para el cálculo de la propagación de incertidumbres, basado en una descripción sencilla de las desviaciones de las medidas de las sondas. De esta forma, es posible, además de estimar el rango de incertidumbre, evaluar la sensibilidad de los resultados del procedimiento experimental frente al error en la medida de cada sonda.

3.3.1. Error en la medida de temperatura de la sonda

El presente análisis se centra únicamente en la posible desviación en la medida de la sonda asociada a cada nivel de temperatura. No se consideran, por tanto, los errores relacionados con el ruido en la medida; ya que pueden ser mitigados escogiendo un incremento de temperatura en la integración suficientemente amplio ($\Delta T_{int} \gg \delta T_{ruido}$). De este modo, en el método desarrollado a continuación, se describen las posibles desviaciones en la medida de las temperaturas comprendidas en el intervalo $[T_1, T_2]$ como las variables aleatorias resultantes de la unión mediante una recta de los errores en los puntos extremos de dicho intervalo (δT_1 y δT_2 , Ec. 35). A su vez, estos errores atribuidos a los puntos extremos (δT_1 y δT_2), se consideran variables aleatorias independientes y están comprendidos dentro del rango de incertidumbre propio de la sonda. Este sencillo modelo

es equivalente a la elaboración de una recta de calibración a partir de las desviaciones detectadas en los puntos T_1 y T_2 .

$$\delta T(T) = \delta T_1 \cdot \frac{T_2 - T}{T_2 - T_1} + \delta T_2 \cdot \frac{T - T_1}{T_2 - T_1} \quad T \in [T_1, T_2] \quad \text{Ec. 35}$$

Es preciso señalar que, pese a que este modelo supone una manera simplificada para describir el error de medida de la sonda, es más realista que asumir una desviación constante dentro del intervalo completo de temperaturas analizado. Por otro lado, la consideración del error asociado a cada nivel térmico como una variable aleatoria independiente de la del resto de temperaturas, produciría una desviación nula al realizar la integración de los resultados experimentales.

3.3.2. Propagación de incertidumbres a través del método

A partir de la descripción matemática de los errores en la medida de temperatura, se procede al estudio de su influencia en los cálculos del método. Se ha tomado la ecuación 36 para la evaluación de la variación de entalpía en el PCM entre las temperaturas T y T_1 .

$$\Delta h_{PCM}|_{T,T_1} = h_{PCM}(T) - h_{PCM}(T_1) = \left(\frac{m_{ref} \cdot c_{p,ref} + m_t \cdot c_{p,t}}{m_{PCM}} \cdot \frac{I_{PCM}|_{T,T_1}}{I_{ref}|_{T,T_1}} - \frac{m_t}{m_{PCM}} \cdot c_{p,t} \right) \cdot (T - T_1) \quad \text{Ec.36}$$

En ella, las variables I_{PCM} e I_{ref} corresponden a las respectivas integrales a lo largo del tiempo del salto de temperaturas entre el ambiente y la muestra (Ec. 37 y 38).

$$I_{PCM}|_{T,T_1} = \int_{T_{PCM}=T_1}^{T_{PCM}=T} (T_\infty - T_{PCM}) \cdot dt \quad \text{Ec. 37}$$

$$I_{ref}|_{T,T_1} = \int_{T_{ref}=T_1}^{T_{ref}=T} (T_\infty - T_{ref}) \cdot dt \quad \text{Ec. 38}$$

En la ecuación 36 se pueden introducir los errores de las medidas de temperatura correspondientes a la muestra de PCM, la referencia y el ambiente. De esta manera, la evaluación del incremento de entalpía queda formulada mediante la ecuación 39. De manera análoga, se puede plantear la expresión correspondiente a la estimación del calor específico (Ec. 40).

$$\Delta \hat{h}_{PCM}|_{T,T_1} = \frac{m_{ref} \cdot c_{p,ref} + m_t \cdot c_{p,t}}{m_{PCM}} \cdot \frac{I_{PCM}|_{T,T_1} + \delta T_{\infty} \cdot \Delta t_{PCM} - I_{\delta T_{PCM}}|_{T,T_1}}{I_{ref}|_{T,T_1} + \delta T_{\infty} \cdot \Delta t_{ref} - I_{\delta T_{ref}}|_{T,T_1}} \cdot (T - T_1 + \delta T_{ref}(T) - \delta T_{ref,1}) - \frac{m_t}{m_{PCM}} \cdot c_{p,t} \cdot (T - T_1 + \delta T_{PCM}(T) - \delta T_{PCM,1}) \quad Ec. 39$$

$$\hat{c}_{p,PCM}|_{T,T_1} = \frac{m_{ref} \cdot c_{p,ref} + m_t \cdot c_{p,t}}{m_{PCM}} \cdot \frac{I_{PCM}|_{T,T_1} + \delta T_{\infty} \cdot \Delta t_{PCM} - I_{\delta T_{PCM}}|_{T,T_1}}{I_{ref}|_{T,T_1} + \delta T_{\infty} \cdot \Delta t_{ref} - I_{\delta T_{ref}}|_{T,T_1}} \cdot \frac{(T - T_1 + \delta T_{ref}(T) - \delta T_{ref,1})}{(T - T_1 + \delta T_{PCM}(T) - \delta T_{PCM,1})} - \frac{m_t}{m_{PCM}} \cdot c_{p,t} \quad Ec. 40$$

En ambas ecuaciones (Ec. 39 y 40), los términos $I_{\delta T_{PCM}}|_{T,T_1}$ e $I_{\delta T_{ref}}|_{T,T_1}$ se corresponden con la integral temporal del error dentro del intervalo de temperaturas analizado (T_1, T). A modo de ejemplo, la ecuación 41 da cuenta de la formulación de esta integral particularizada para el caso de la medida de temperatura en la muestra con PCM. Debido a que se ha realizado una descripción lineal del error en la medida de las sondas (Ec. 35), esta integral (Ec. 41) se puede expresar mediante el producto de dos términos: por una parte, la ponderación del mencionado error, en la que interviene el promedio temporal de la temperatura de la muestra (\bar{T}_{PCM}), y, por otra parte, el tiempo que transcurre hasta que el nivel térmico de esta sustancia varía de T_1 a T ($\Delta t_{PCM}|_{T_1,T}$).

$$I_{\delta T_{PCM}}|_{T,T_1} = \int_{T_{PCM}=T_1}^{T_{PCM}=T} \delta T_{PCM}(T) \cdot dt \quad Ec. 41$$

$$= \left(\delta T_1 \cdot \frac{T_2 - \bar{T}_{PCM}}{T_2 - T_1} + \delta T_2 \cdot \frac{\bar{T}_{PCM} - T_1}{T_2 - T_1} \right) \cdot \Delta t_{PCM}|_{T_1,T}$$

A partir de la ecuación 39, se puede desarrollar la fórmula de propagación de incertidumbres clásica utilizando sus derivadas parciales con respecto a las variables aleatorias independientes consideradas ($\delta T_{1,PCM}$, $\delta T_{2,PCM}$, $\delta T_{1,ref}$, $\delta T_{2,ref}$, δT_{amb}) (Ec. 42). De forma análoga, se plantearía la correspondiente a la propagación de errores a través la estimación del calor específico.

$$\delta(\Delta h_{PCM}|_{T,T_1}) = \sqrt{\sum \left(\frac{\partial(\Delta h_{PCM}|_{T,T_1})}{\partial(\delta T_{i,j})} \cdot \delta T_{i,j} \right)^2} \quad Ec. 42$$

Resulta más cómodo analizar estos resultados en términos relativos. Así pues, se presenta en este formato la ecuación 43, en la que se utiliza la denominación $s_{\delta T}$ para designar la sensibilidad del error relativo frente a cada desviación considerada.

$$\frac{\delta(\Delta h_{PCM|T,T_1})}{\Delta h_{PCM|T,T_1}} = \sqrt{\sum \left(\frac{\partial(\Delta h_{PCM|T,T_1})}{\partial(\delta T_{i,j})} \cdot \delta T_{i,j} \right)^2} = \sqrt{\sum (s_{\delta T_{i,j}} \cdot \delta T_{i,j})^2} \quad Ec. 43$$

En la tabla 3.5 se muestran los resultados del desarrollo matemático –omitido en este documento– que permite obtener las expresiones para la evaluación de la sensibilidad de la medida de la variación de entalpía y del calor específico con respecto a cada parámetro.

Variable	Sensibilidad $\Delta h_{PCM T,T}$ ($s_{\delta T_{i,j}} \cdot \delta T_{i,j}$)	Sensibilidad $c_{p,PCM T,T}$ ($s_{\delta T_{i,j}} \cdot \delta T_{i,j}$)
$\delta T_{ref,1}$	$-\left(1 + \frac{m_t \cdot \Delta h_t}{m_{PCM} \cdot \Delta h_{PCM}}\right) \cdot \frac{T_{\infty} - T_2}{T_{\infty} - \bar{T}_{ref} _{T_1,T}} \cdot \frac{\delta T_{ref,1}}{T_2 - T_1}$	$-\left(1 + \frac{m_t \cdot c_{p,t}}{m_{PCM} \cdot c_{p,PCM}}\right) \cdot \frac{T_{\infty} - T_2}{T_{\infty} - \bar{T}_{ref} _{T_1,T}} \cdot \frac{\delta T_{ref,1}}{T_2 - T_1}$
$\delta T_{ref,2}$	$\left(1 + \frac{m_t \cdot \Delta h_t}{m_{PCM} \cdot \Delta h_{PCM}}\right) \cdot \frac{T_{\infty} - T_1}{T_{\infty} - \bar{T}_{ref} _{T_1,T}} \cdot \frac{\delta T_{ref,2}}{T_2 - T_1}$	$\left(1 + \frac{m_t \cdot c_{p,t}}{m_{PCM} \cdot c_{p,PCM}}\right) \cdot \frac{T_{\infty} - T_1}{T_{\infty} - \bar{T}_{ref} _{T_1,T}} \cdot \frac{\delta T_{ref,2}}{T_2 - T_1}$
$\delta T_{PCM,1}$	$\left[\left(1 + \frac{m_t \cdot \Delta h_t}{m_{PCM} \cdot \Delta h_{PCM}}\right) \cdot \frac{T_{\infty} - T_2}{T_{\infty} - \bar{T}_{PCM} _{T_1,T}} - 1\right] \cdot \frac{\delta T_{PCM,1}}{T_2 - T_1}$	$\left(1 + \frac{m_t \cdot c_{p,t}}{m_{PCM} \cdot c_{p,PCM}}\right) \cdot \frac{T_{\infty} - T_2}{T_{\infty} - \bar{T}_{PCM} _{T_1,T}} \cdot \frac{\delta T_{PCM,1}}{T_2 - T_1}$
$\delta T_{PCM,2}$	$\left[1 - \left(1 + \frac{m_t \cdot \Delta h_t}{m_{PCM} \cdot \Delta h_{PCM}}\right) \cdot \frac{T_{\infty} - T_1}{T_{\infty} - \bar{T}_{PCM} _{T_1,T}}\right] \cdot \frac{\delta T_{PCM,2}}{T_2 - T_1}$	$-\left(1 + \frac{m_t \cdot c_{p,t}}{m_{PCM} \cdot c_{p,PCM}}\right) \cdot \frac{T_{\infty} - T_1}{T_{\infty} - \bar{T}_{PCM} _{T_1,T}} \cdot \frac{\delta T_{PCM,2}}{T_2 - T_1}$
δT_{amb}	$\left(1 + \frac{m_t \cdot \Delta h_t}{m_{PCM} \cdot \Delta h_{PCM}}\right) \cdot \frac{(\bar{T}_{PCM} _{T_1,T} - \bar{T}_{ref} _{T_1,T}) \cdot \delta T_{amb}}{(T_{\infty} - \bar{T}_{PCM} _{T_1,T}) \cdot (T_{\infty} - \bar{T}_{ref} _{T_1,T})}$	$\left(1 + \frac{m_t \cdot c_{p,t}}{m_{PCM} \cdot c_{p,PCM}}\right) \cdot \frac{(\bar{T}_{PCM} _{T_1,T} - \bar{T}_{ref} _{T_1,T}) \cdot \delta T_{amb}}{(T_{\infty} - \bar{T}_{PCM} _{T_1,T}) \cdot (T_{\infty} - \bar{T}_{ref} _{T_1,T})}$

Tabla 3.5. Sensibilidad de la medida de variación de entalpía y calor específico respecto a los errores en la medida de temperatura del sensor.

Como se observa, la implementación de este procedimiento para el cálculo de la propagación de incertidumbres es sencillo, sólo requiere la cuantificación adicional del promedio temporal de la temperatura del PCM y la referencia correspondiente al intervalo de térmico que se analiza ($\bar{T}_{PCM}|_{T_1,T}$, $\bar{T}_{ref}|_{T_1,T}$).

Con respecto a las fórmulas presentadas por Zhang et al. (1999) y Rady et al. (2009), las obtenidas en esta tesis ponen de manifiesto el efecto de la amplificación de la propagación de los errores asociado a la relación entre la masa térmica del portamuestras y de la sustancia que se analiza. Esta relación es más crítica en el cálculo del calor específico, mientras que durante el cambio de fase, la variación de energía térmica latente reduce este fenómeno de amplificación.

A modo de ejemplo, en la figura 3.7 se muestra el cálculo de la propagación de incertidumbres aplicado sobre una curva entalpía-temperatura obtenida experimentalmente para la sustancia GR27 (Rubitherm). Los datos provienen de un ensayo de fusión, presentado en la sección 3.4 de este capítulo, en el que se ha utilizado una temperatura de la cámara (T_{∞}) de 35°C. Adicionalmente, la figura presenta la sensibilidad del cálculo de la variación de entalpía con respecto a las desviaciones en las tres medidas de temperatura (δT_{PCM} , δT_{ref} y δT_{∞}). La contribución principal corresponde a los posibles errores en la medida de las sondas colocadas en las muestras (PCM y referencia), mientras que la exactitud en la determinación de la temperatura de la cámara es menos crítica.

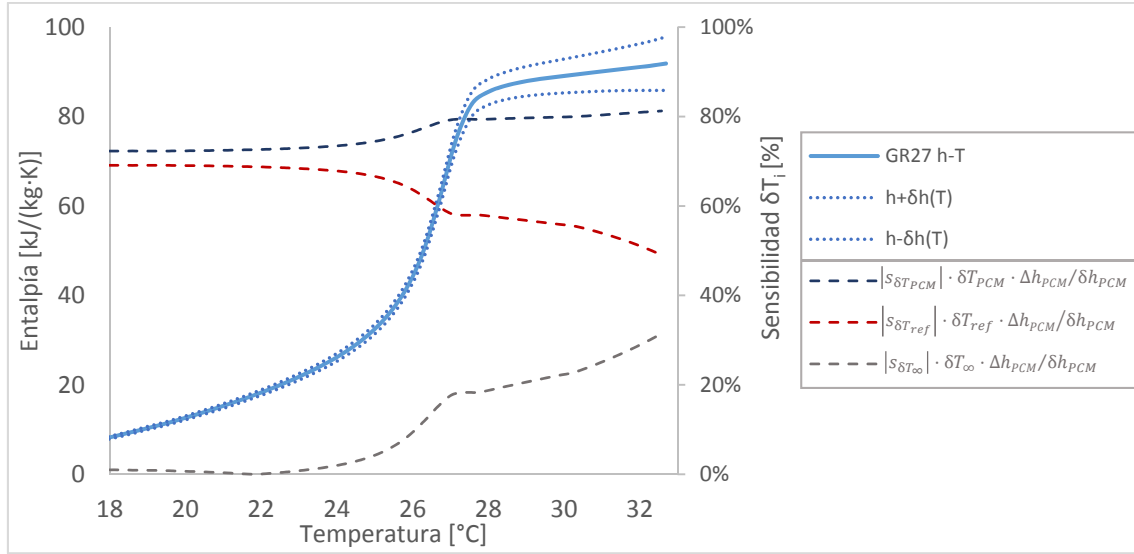


Fig. 3. 7. Ejemplo de cálculo de propagación de incertidumbres a través de los cálculos del método T-history: ensayo de fusión GR27 ($T_1=15^\circ\text{C}$, $T_\infty=35^\circ\text{C}$, $\delta T_{PCM}=\delta T_{ref}=\delta T_\infty=\pm 0,15^\circ\text{C}$).

Por otro lado, si se desprecia la contribución de ciertos términos, las expresiones desarrolladas pueden ser simplificadas de tal manera que se obtiene una aproximación del error en la estimación de varios parámetros: calor específico (Ec. 44), entalpía de cambio de fase (Ec. 45) y variación entalpía total medida en el ensayo (Ec. 46). Es interesante señalar que la aproximación correspondiente a la desviación de la entalpía de cambio de fase (Ec. 45) coincide con la fórmula propuesta por Rady et al. (2009).

$$\frac{\delta(c_{p,PCM}|_{T_1,T_2})}{c_{p,PCM}|_{T_1,T_2}} \approx 2 \cdot \frac{\delta T}{T_2-T_1} \cdot \left(1 + \frac{m_t \cdot c_{p,t}}{m_{PCM} \cdot c_{p,PCM}}\right) = 2 \cdot \frac{\delta T}{T_2-T_1} \cdot \frac{1}{C_{r,PCM}} \quad \text{Ec. 44}$$

$$\frac{\delta(\Delta h_{PCM}|_{T_{m1},T_{m2}})}{\Delta h_{PCM}|_{T_{m1},T_{m2}}} \approx \sqrt{2} \cdot \frac{\delta T}{T_{m2}-T_{m1}} \quad \text{Ec. 45}$$

$$\frac{\delta(\Delta h_{PCM}|_{T_1,T_\infty})}{\Delta h_{PCM}|_{T_1,T_\infty}} \approx \sqrt{2} \cdot \frac{\delta T}{T_\infty-T_m} \cdot \left(1 + \frac{m_t \cdot \Delta h_t}{m_{PCM} \cdot \Delta h_{PCM}}\right) \quad \text{Ec. 46}$$

Teniendo en cuenta la exactitud de las termo-resistencias de la instalación utilizada en la tesis ($\pm 0,15^\circ\text{C}$), se puede realizar una comparación de las desviaciones producidas por el error de medida de las sondas con las ocasionadas por el gradiente térmico debido a la conducción del calor en las muestras.

En el caso del calor específico, el error en la medida de temperatura de las sondas produce una desviación de aproximadamente $\pm(1/C_{r,PCM}) \cdot 6\%$ (para una diferencia de temperaturas de 5°C), superior -especialmente si se tiene en cuenta la masa térmica del portamuestras- al error máximo asociado al gradiente radial de temperatura (5%,

$Bi_{PCM}=h \cdot R/(2 \cdot \lambda)=0,1$). Sin embargo, en el caso de la medida de la entalpía de cambio de fase, la desviación relacionada con el error de las sondas ($\approx \pm 4\%$, para un intervalo de temperaturas de cambio de fase de 5°C) es menor a la ocasionada por la conducción del calor en las condiciones más desfavorables ($\approx 10\%$, $Bi_{PCM}=h \cdot R/(2 \cdot \lambda)=0,1$).

A partir de este análisis se puede concluir que, pese a que la influencia del número de Biot en la estimación del calor específico puede quedar oculta por el error de medida de las sondas -y, por tanto, ser despreciada-, conviene considerar el efecto de este número adimensional en la determinación de la entalpía de cambio de fase.

Por otro lado, si se tienen en cuenta, en primer lugar, los resultados del estudio teórico sobre la influencia de los gradientes térmicos en muestras de materiales sólidos, que señalan cómo la exactitud de la estimación de la variación de entalpía no depende de los saltos térmicos aplicados en los experimentos, y, en segundo lugar, la estimación que proporciona la ecuación 46, se puede concluir que resulta conveniente realizar ensayos con una diferencia suficientemente amplia, en comparación con la incertidumbre de la medida de las sondas, entre la temperatura de la cámara y la de cambio de fase del material ($(T_\infty - T_m) > \delta T_m$). Es asimismo aconsejable utilizar portamuestras “ligeros” en relación a la masa térmica de la sustancia que se analiza ($C_{r,i} \approx 1$).

3.4. Determinación de la curva entalpía-temperatura mediante T-history

3.4.1. Materiales analizados

Se ha seleccionado un conjunto de materiales compuestos con PCM actualmente comercializados que se pueden utilizar como aditivos en forma de gránulos para el material de mortero del suelo radiante. Por un lado, se han escogido los de la familia de compuestos denominada por el fabricante Rubitherm como “GR”. En estos materiales, suministrados en forma de partículas de entre 0,2 y 0,6mm o 1 y 3mm, la parafina está absorbida, constituyendo aproximadamente un 35% de la masa total, dentro de un compuesto mineral que contiene tierra de diatomeas (según afirma la patente EP1628110A1, 2006). El otro grupo de materiales seleccionado es el designado por el mismo fabricante por el prefijo “PX”. En este compuesto el PCM está impregnado en pequeños gránulos de un diámetro aproximado de $150\mu\text{m}$ de sílice pirógena (Li et al. 2014b). El contenido en PCM de estas partículas es aproximadamente de 60%.

El fabricante suministra ambos tipos de compuestos combinados con distintas parafinas. Para la aplicación concreta de suelo radiante se han seleccionado las temperaturas de cambio de fase de 27, 31 y 42°C , de acuerdo con el rango de temperaturas de fusión y solidificación que había sido utilizado en otros trabajos publicados hasta ese momento (p.ej. Farid y Kong (2001), Lin et al. 2005)

3.4.2 Metodología

Los materiales se han analizado en la instalación T-history de la Universidad de Zaragoza. Su proceso de diseño y desarrollo se halla descrito en la tesis doctoral de Lázaro

(2008). En el mismo documento se recoge el procedimiento llevado a cabo para la verificación de dicha instalación a través de la comparación de las medidas realizadas sobre sustancias conocidas (hexadecano y galio). Las desviaciones observadas fueron en todos los casos menores al 12%.

En la figura 3.8 se muestra el dispositivo experimental completo. En él, la medida de la temperatura se realiza mediante termo-resistencias PT-100 de clase DIN 1/10, conectadas a cuatro hilos, cuya tolerancia está comprendida entre 0,03 y 0,08°C. Se mide la temperatura de las muestras (referencia y PCM) en el centro de las mismas. El sistema de adquisición de datos utilizado es un equipo Agilent 34970, que introduce sobre estas medidas de temperatura una desviación máxima de 0,06°C.

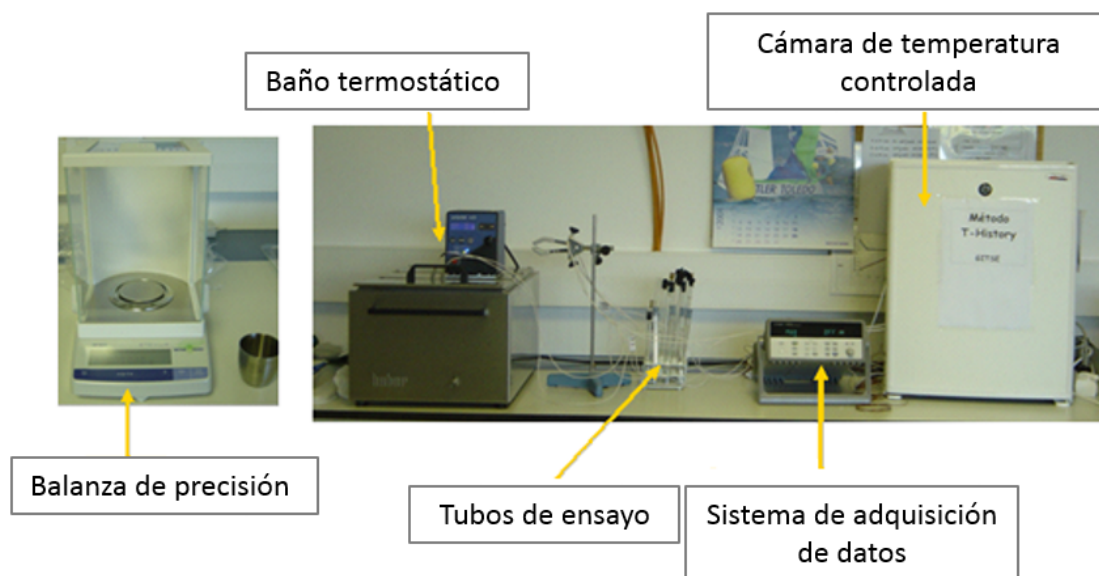


Fig. 3. 8. Instalación T-history utilizada para la determinación de las curvas entalpía-temperatura (Lázaro 2008).

En la preparación de las muestras se ha prestado especial atención a la compactación de los materiales granulados, con el objetivo de reducir los efectos relacionados con las resistencias térmicas ocasionadas por los espacios ocupados por aire. En el caso de los compuestos denominados por el fabricante bajo el prefijo “GR”, los gránulos de 1 a 3mm han sido previamente molidos en un mortero de laboratorio.

De cada muestra se han realizado tres ensayos de fusión y solidificación respectivamente, excepto en el caso de los materiales con cambio de fase en torno a 42°C en los que la temperatura máxima de la cámara no permitió la realización de ensayos de fusión. El mismo número de ensayos se ha repetido tras la aplicación de 20 ciclos de fusión-solidificación sobre todas las muestras con el objetivo de identificar algún posible fenómeno de degradación en los materiales.

A partir de las curvas entalpía-temperatura obtenidas mediante la integración directa de los resultados experimentales, realizada según el procedimiento propuesto por Marín et al. (2003), se han aplicado las correcciones para la entalpía y temperatura de cambio de fase extraídas del análisis teórico descrito en la sección 3.2 de este capítulo. El

número de Biot de los ensayos de la instalación T-history ($Bi_{PCM}=h \cdot R/\lambda_{PCM}=0,2$) se ha calculado según del coeficiente de transferencia de calor determinado a partir de los resultados experimentales y la conductividad térmica proporcionada por el fabricante ($0,2W/(m \cdot K)$, Rubitherm). En el apartado 3.5.5, donde se realiza una comparación de estas medidas con el incremento de entalpía evaluado mediante un método complementario y con los valores publicados en otros trabajos de investigación (Rady et al. 2009), se comprueba que la aplicación de estas correcciones permite alcanzar un mayor grado de concordancia entre los distintos resultados.

3.4.3. Resultados

En la tabla 3.6 se resume la información obtenida a partir de los ensayos T-history realizados, mientras que en las figuras 3.9 y 3.10 se muestran las curvas entalpía-temperatura medidas, respectivamente, para los materiales tipo GR y PX. El intervalo de incertidumbre asignado a los valores y curvas presentados se ha calculado mediante el procedimiento descrito en el apartado 3.3.

Material	ΔT [°C]	Δh [kJ/kg]	$c_{p,s}$ [kJ/(kg·K)]	$c_{p,l}$ [kJ/(kg·K)]	Histéresis	Degradación tras 20 ciclos
GR27	20-30°C	76±3	1,7±0,2	1,3±0,2	<0,2°C	No
GR31	23-33°C	72±3	2±0,2	1,4±0,2	No	No
GR42	33-43°C	60±3	1,8±0,2	1,5±0,2	-	No
PX27	19-29°C	100±4	2,3±0,2	2,2±0,2	≈1,2°C	No
PX31	23-33°C	113±4	3,4±0,3	2,2±0,2	0,2°C	No
PX42	33-43°C	134±5	3±0,3	3±0,3	-	No

Tabla 3. 6. Resumen de las medidas realizadas en la instalación de T-history.

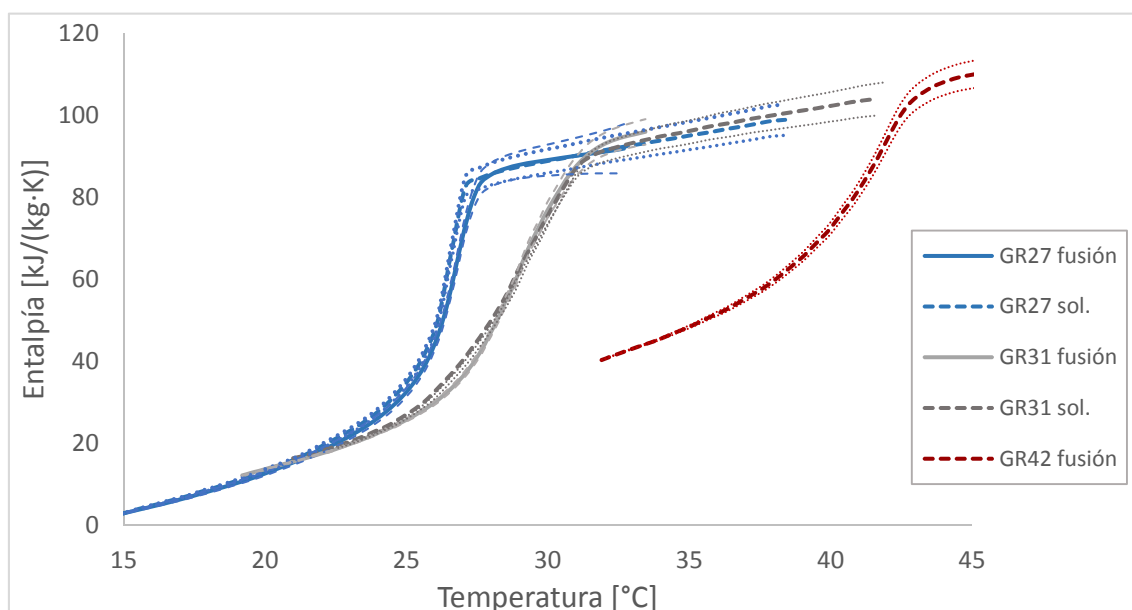


Fig. 3. 9. Curvas entalpía temperatura medidas de los materiales GR27, 31 y 42.

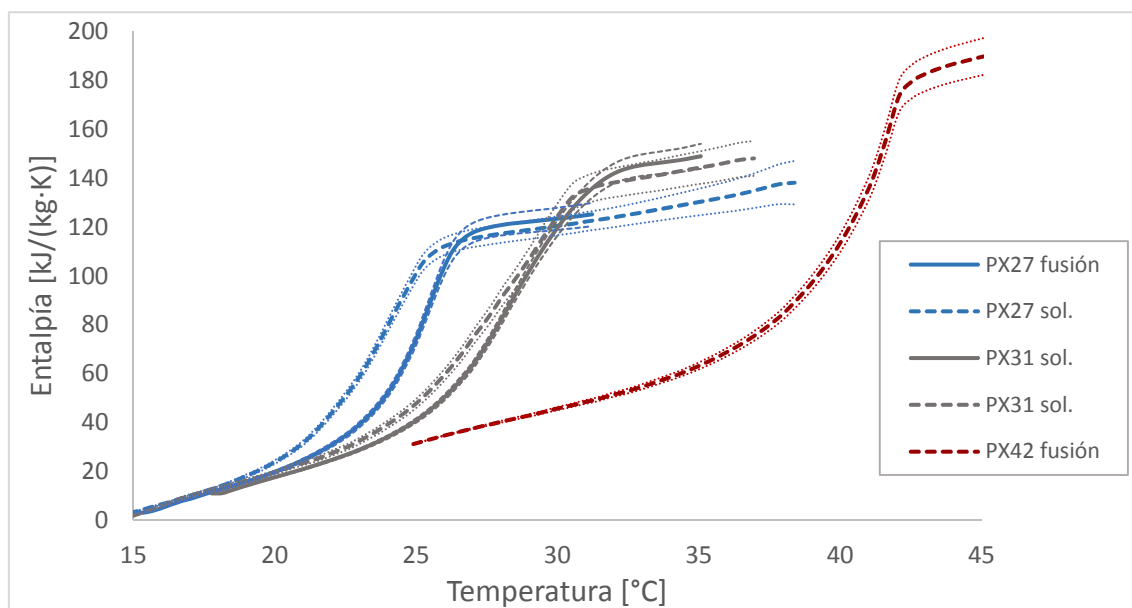


Fig. 3. 10. Curvas entalpía temperatura medidas de los materiales PX27, 31 y 42.

En ninguno de los materiales analizados se ha percibido una degradación de la capacidad de almacenamiento térmico tras experimentar 20 ciclos de solidificación. Por otro lado, las curvas obtenidas a partir del método T-history muestran un leve fenómeno de histéresis en los compuestos PX27 y PX31. En el caso de los materiales de la familia GR, sin embargo, este fenómeno es prácticamente inapreciable ($<0,2^{\circ}\text{C}$ en el material GR27).

En los materiales PX se ha observado una aglutinación de las partículas de la muestra en una masa sólida tras la aplicación de los sucesivos procesos de fusión correspondientes a los ensayos. Este fenómeno puede ser debido al fugado del material en estado líquido. Por este motivo, se ha descartado este compuesto y optado por la selección del material denominado GR para su integración en el mortero del suelo radiante.

Esta observación coincide con otros estudios que han sido publicados posteriormente. Lin et al. (2014b) cuantificaron en un 60% la cantidad de parafina fugada durante el proceso de mezclado de la masa de hormigón con este material compuesto (PX25). Atribuyeron este acusado fenómeno al carácter hidrófilo de la sílice pirógena del compuesto, que tendía a expulsar el PCM absorbido PCM en presencia del agua utilizada para conformación del hormigón.

3.5. Medida complementaria de la variación de entalpía en materiales granulados: estudio experimental balance de energía en el intercambio de calor con aire en un lecho axial

En esta sección se propone la realización de medidas experimentales complementarias sobre la variación de entalpía en algunos materiales granulados con PCM, de manera que se puedan comparar con los resultados obtenidos a partir de la metodología

T-history. Según la predicción que proporciona el modelo teórico de transferencia de calor en las muestras (sección 3.2), los gradientes de temperatura asociados a la conducción del calor radial producen sobreestimaciones importantes, de hasta el 10%, en la evaluación de la entalpía de cambio de fase. El objetivo de estas segundas medidas es analizar este efecto a través de la comparación de los resultados de ambos procedimientos.

Con este fin, se ha utilizado la instalación experimental desarrollada por Dolado et al. (2014), que permite la evaluación del balance de energía correspondiente al intercambio de calor entre una corriente de aire y un lecho del material granulado con PCM. Mediante esta cuantificación, pese a no ser posible la determinación directa de la curva entalpía-temperatura, se puede medir de una forma razonablemente exacta la variación de energía térmica del material en contacto con el flujo de aire. Por ejemplo, Zalba (2002) desarrolló un dispositivo experimental para medir el intercambio de energía térmica entre un caudal de aire y macrocápsulas con PCM en forma de placa con gran exactitud (desviación de $\pm 1,3W$, menor al $\pm 1,5\%$). Por otro lado, la aplicación de esta metodología para la evaluación de materiales granulados tiene la ventaja adicional de permitir el análisis de una muestra significativa del compuesto (en torno a 30g en esta instalación).

El propósito en esta sección es lograr una medida de la variación de entalpía de materiales granulados con PCM con una exactitud razonable (en torno a $\pm 5\%$) para establecer una comparación con los resultados del método T-history. Así pues, una parte importante del trabajo se ha dedicado a la determinación de las condiciones de ensayo bajo las que se obtiene una mayor exactitud en esta medida (sección 3.5.3). No obstante, el dispositivo experimental puede admitir mejoras que reduzcan este error. Desde este punto de vista, el análisis de sensibilidad presentado en el apartado 3.5.4 (tabla 3.9) proporciona información útil para este posible trabajo futuro.

3.5.1. Descripción del método

En la mencionada instalación se puede estudiar el intercambio de calor entre una corriente de aire, a temperatura controlada –superior a la del ambiente- y caudal volumétrico constante (entre 2 y 8l/min), y un lecho de gránulos con PCM. En la figura 3.11 se muestra la disposición particular utilizada en los ensayos. En ella, se miden las temperaturas (con termopares tipo T), por un lado, de la corriente de aire a la entrada y salida del lecho y, por otro lado, de la superficie exterior del conducto donde se aloja el lecho en tres puntos. La incertidumbre asociada a estas medidas se ha tenido en cuenta en la determinación de las condiciones de ensayo más adecuadas para minimizar el error en el cálculo de la energía térmica intercambiada con el lecho. El caudal volumétrico de aire se mide a partir de un rotámetro calibrado mediante un controlador de flujo (Bronkhorst, EL-FLOW) de exactitud $\pm 0,6\%$. En la tabla 3.7 se recogen las características de las medidas realizadas.

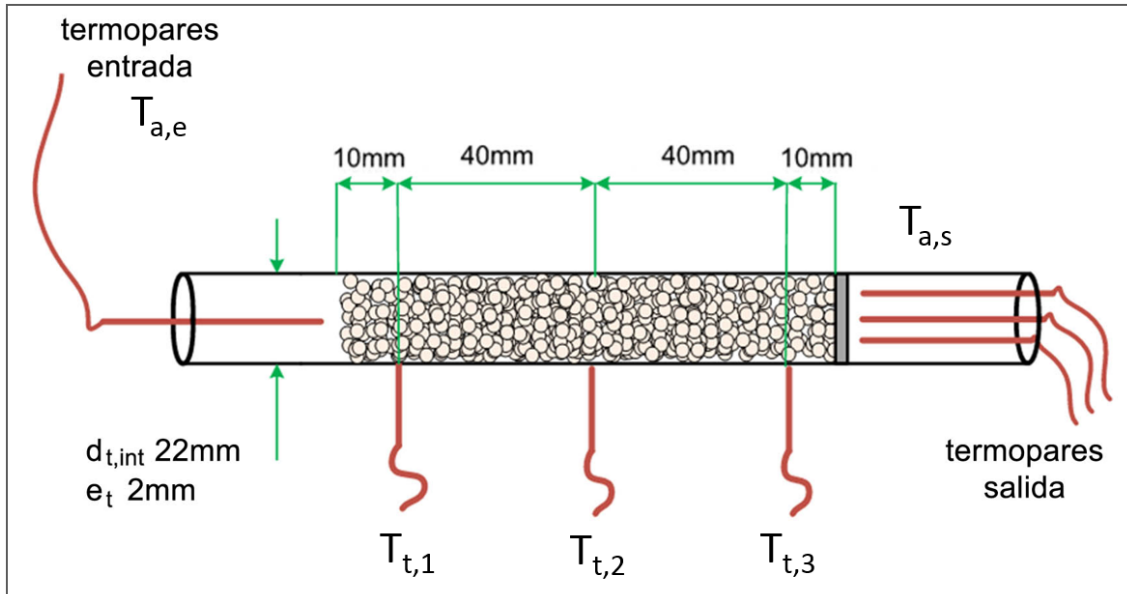


Fig. 3. 11. Representación esquemática del dispositivo experimental utilizado.

Magnitud	Denominación	Sensor	Incertidumbre
Temperatura del aire	$T_{a,e}$, $T_{a,s}$	3 termopares tipo T	$\pm 0,5 \cdot n^{-1/2} ^\circ\text{C}$
Temperatura del conducto	T_{t1} , T_{t2} , T_{t3}	Termopar tipo T	$\pm 0,5 ^\circ\text{C}$
Temperatura ambiente	T_∞	Termopar tipo T	$\pm 0,5 ^\circ\text{C}$
Caudal volumétrico	\dot{V}	Rotámetro calibrado	$\pm 0,18 \text{ l/min}$

Tabla 3. 7. Magnitudes medidas en la instalación utilizada para el estudio del balance de energía en el intercambio de energía térmica entre lechos de granulos con PCM y aire.

En el procedimiento experimental, tanto el conducto como el PCM se encuentran inicialmente en equilibrio térmico con el ambiente (T_{amb}). El ensayo comienza cuando se conecta el mencionado conducto a la corriente de aire de temperatura controlada y termina cuando el sistema alcanza la situación estacionaria final -cesa de la variación temporal de energía térmica en los elementos que lo componen-. En la figura 3.14 (sección 3.5.4) se muestra un ejemplo de la variación registrada de las temperaturas durante el experimento. El método permite la estimación directa del salto de entalpía del material granulado a través de la evaluación del balance de energía. En la ecuación 47 se presenta este balance, integrado a lo largo de la duración completa del ensayo. En ella se han tenido en cuenta las siguientes contribuciones: balance de energía al flujo de aire (EB_a), pérdidas de calor hacia el ambiente (L) e incremento de energía térmica que experimentan el material granulado ($m_{PCM} \cdot \Delta h_{PCM}$) y su recipiente (ΔE_t). Se desprecia en este caso el efecto de la conducción del calor axial a través de las paredes del recipiente y de la propia corriente de aire a este balance.

$$m_{PCM} \cdot \Delta h_{PCM} = \int_{t=0}^{t_{\infty}} (T_{a,e} - T_{a,s}) \cdot \dot{m}_a \cdot c_{p,a} \cdot dt - \int_{x=0}^{L_b} (T_t|_{t_{\infty}} - T_{\infty}) \cdot \frac{m_t}{L_b} \cdot c_{p,t} \cdot dx - \int_{t=0}^{t_{\infty}} (\bar{T}_t - T_{\infty}) \cdot h_{r-c} \cdot A_t \cdot dt = EB_a - \Delta E_t - L \quad Ec. 47$$

La cuantificación de las pérdidas en la superficie exterior del conducto se realiza mediante la evaluación del coeficiente equivalente de transferencia de calor asociado a los fenómenos de convección y radiación. Este coeficiente se calcula a partir de la situación estacionaria final, en la que las pérdidas suponen la única contribución a la variación de entalpía asociada a la corriente de aire (Ec. 48).

$$(T_{a,e} - T_{a,s})|_{t_{\infty}} \cdot \dot{m}_a \cdot c_{p,a} = (\bar{T}_t - T_{\infty}) \cdot A_t \cdot h_{c-r}|_{t_{\infty}} \quad Ec. 48$$

En la extrapolación del valor de este coeficiente de transferencia de calor dentro del rango de temperaturas que experimenta la superficie del conducto durante el ensayo ($\bar{T}_t(t)$), se tiene en cuenta su dependencia con el salto térmico entre dicha superficie y el entorno. En la ecuación 49 se muestra el modelo teórico utilizado para desglosar el coeficiente de pérdidas en ambas componentes: radiante y convectiva.

$$h_{c-r} = \left[\varepsilon_t \cdot \sigma \cdot \frac{(\bar{T}_t^4 - T_{\infty}^4)}{(\bar{T}_t - T_{\infty})} + C_n \cdot (\bar{T}_t - T_{\infty})^{0,33} \right] \quad Ec. 49$$

Se ha tomado un exponente de 0,33 para el salto de temperaturas en la estimación de la convección natural de acuerdo con la correlación de Churchill y Chu (1975). Asimismo, se estima una emisividad de la superficie del tubo (ε_t) de 0,9. De esta manera, la constante C_n , vinculada al cálculo de la convección natural, se despeja a partir del coeficiente de transferencia de calor obtenido en la situación estacionaria final ($h_{c-r}|_{t_{\infty}}$) (Ec. 50).

$$C_n = \frac{h_{c-r}|_{t_{\infty}} - \varepsilon_t \cdot \sigma \cdot \frac{(\bar{T}_t|_{t_{\infty}}^4 - T_{\infty}^4)}{(\bar{T}_t|_{t_{\infty}} - T_{\infty})}}{(\bar{T}_t|_{t_{\infty}} - T_{\infty})^{0,33}} \quad Ec. 50$$

3.5.2. Propagación de incertidumbres en la medida experimental del incremento de entalpía

Se ha realizado un análisis de propagación de incertidumbres a través de los cálculos descritos con el objetivo de determinar unas condiciones de ensayo favorables que produzcan unas desviaciones razonables en la estimación del incremento de entalpía que experimenta el material con PCM. En la ecuación 51 se presenta la propagación de errores aplicada sobre el procedimiento de cálculo definido por la ecuación 47. En esta aproximación se han considerado las tres contribuciones al balance de energía (variación

de entalpía de la corriente de aire, EB_a ; variación de energía térmica del conducto, ΔE_t ; y pérdidas, L) como variables aleatorias independientes. Este análisis de propagación de errores resalta la influencia principal de la relación entre estas tres contribuciones en la desviación del cálculo del incremento de entalpía del PCM. De esta forma, el efecto más relevante es la amplificación del error producido por la relación $EB_a/\Delta H_{PCM}$, lo cual indica la necesidad de realizar ensayos con unas pérdidas e inercia térmica del conducto bajas en comparación al incremento de entalpía del lecho.

$$\frac{\delta(\Delta H_{PCM})}{\Delta H_{PCM}} = \sqrt{\left(\frac{EB_a}{\Delta H_{PCM}}\right)^2 \cdot e_{EB_a}^2 + \left(\frac{\Delta E_t}{\Delta H_{PCM}}\right)^2 \cdot e_{\Delta E_t}^2 + \left(\frac{L}{\Delta H_{PCM}}\right)^2 \cdot e_L^2} = \sqrt{\left(1 + \frac{\Delta E_t}{\Delta H_{PCM}} + \frac{L}{\Delta H_{PCM}}\right)^2 \cdot e_{EB_a}^2 + \left(\frac{\Delta E_t}{\Delta H_{PCM}}\right)^2 \cdot e_{\Delta E_t}^2 + \left(\frac{L}{\Delta H_{PCM}}\right)^2 \cdot e_L^2} \quad Ec. 51$$

Por otro lado, el cálculo de la incertidumbre de cada contribución al balance de energía se realiza mediante las ecuaciones 52, 53 y 54.

$$\frac{\delta EB_a}{EB_a} = \sqrt{\left(\frac{\delta \dot{m}_a}{\dot{m}_a}\right)^2 + \left(\frac{\delta(\Delta T_a)}{\Delta T_a}\right)^2} \quad Ec. 52$$

$$\frac{\delta E_{vid}}{E_{vid}} = \sqrt{\left(\frac{\delta c_{p,t}}{c_{p,t}}\right)^2 + \left(\frac{\delta(\Delta T_{t,\infty})}{\Delta T_{t,\infty}|_{t_\infty}}\right)^2} \quad Ec. 53$$

$$\frac{\delta L}{L} = \sqrt{\left(\frac{\delta h}{h}\right)^2 + \left(\frac{\delta(\Delta T_{t,\infty})}{\Delta T_{t,\infty}}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{\delta \dot{m}_a}{\dot{m}_a}\right)^2 + \left(\frac{\delta(\Delta T_a)}{\Delta T_a|_{t_\infty}}\right)^2 + \left(\frac{\delta(\Delta T_{t,\infty})}{\Delta T_{t,\infty}|_{t_\infty}}\right)^2 + \left(\frac{\delta(\Delta T_{t,\infty})}{\Delta T_{t,\infty}}\right)^2} \quad Ec. 54$$

La relación entre las principales condiciones del experimento (temperatura del aire en la entrada, caudal de aire y longitud del lecho) y la propagación de incertidumbres no es obvia: previsiblemente existen algunos efectos contrapuestos. Por ejemplo, al aumentar la temperatura del aire en la entrada del lecho, por una parte, se reduce el error relativo en el cálculo del balance de energía mientras que, por otra parte, crecen las pérdidas y la importancia relativa de la variación de energía térmica asociada a la masa del conducto. Por este motivo, se ha realizado un análisis numérico previo con el fin de cuantificar estos efectos.

3.5.3. Selección de las condiciones de ensayo

3.5.3.1. Modelo numérico

La herramienta de simulación está basada en las siguientes simplificaciones:

- Se considera que la temperatura es uniforme dentro de los gránulos con PCM e igualmente lo es la distribución de temperaturas y el perfil de velocidades en cada sección.
- No se tiene en cuenta la transferencia de calor directa entre distintos gránulos ni entre éstos y las paredes del conducto.
- Las paredes del conducto se asimilan a un sistema de capacidad en la dirección radial, mientras que se desprecia la conducción axial de calor a través de las mismas.
- No se tiene en cuenta la variación temporal de la energía térmica del aire contenido en cada volumen de control.

El objetivo del modelo numérico es obtener una aproximación al comportamiento dinámico del dispositivo experimental sobre la cual se pueda analizar la influencia de los principales parámetros de ensayo sobre la desviación en los resultados. Las principales simplificaciones del modelo (temperatura uniforme en las partículas, modelo unidimensional) son idénticas a las adoptadas por Rady (2009). El citado modelo demostró una aproximación razonable a los resultados experimentales, suficiente para el propósito del presente análisis.

A partir de estas simplificaciones, el modelo se puede representar mediante las ecuaciones 55, 56 y 57. El cálculo del coeficiente de convección natural sobre la superficie exterior del conducto se ha realizado mediante la correlación de Churchill y Chu (1975), mientras que la correlación de Wakao (1979) se ha utilizado para la evaluación del coeficiente de transferencia de calor correspondiente al fenómeno de convección forzada en el lecho ($h_{c,b}$).

$$\dot{m}_a \cdot c_{p,a} \cdot \frac{\partial T_a}{\partial x} = \frac{\pi \cdot D_b^2}{4} \cdot a_b \cdot h_{c,b} \cdot (T_b - T_a) + \pi \cdot D_b \cdot h_{c,b} \cdot (T_t - T_a) \quad Ec. 55$$

$$6 \cdot h_{c,b} \cdot (T_a - T_b) = D_p \cdot \rho_p \cdot \frac{\partial h_{PCM}}{\partial t} \quad Ec. 56$$

$$(D_b + e) \cdot h_{c-r} \cdot (T_\infty - T_t) + D_b \cdot h_{c,b} \cdot (T_\infty - T_t) = \frac{(D_b + e)^2 - D_b^2}{4} \cdot \frac{m_t}{L_b} \cdot c_{p,t} \cdot \frac{\partial T_t}{\partial t} \quad Ec. 57$$

Se ha utilizado el método de la entalpía para calcular el cambio de fase. La discretización temporal se ha realizado mediante el esquema implícito, mientras que en la discretización espacial en la dirección axial del lecho se ha empleado la aproximación de diferencias finitas centradas, ya que el número de Peclet asociado a dicho esquema, debido a la elevada superficie de contacto entre el lecho y la corriente de aire, es de 0,6 (Patankar, 1980). Las ecuaciones han sido implementadas en el programa EES (Klein 2003).

3.5.3.2. Evaluación de la influencia de las condiciones de ensayo

A partir del modelo se ha realizado un análisis paramétrico con el fin de conocer la influencia de las condiciones de ensayo sobre la exactitud de los resultados. De esta manera es posible identificar un rango de valores de estos principales parámetros del experimento que permita la evaluación del incremento de entalpía correspondiente a la masa de PCM con una exactitud de en torno a $\pm 5\%$. En esta sección se presentan los resultados del análisis realizado con el PCM GR31 del fabricante Rubitherm.

En la figura 3.12 se muestra la influencia de la temperatura de entrada y del caudal volumétrico del aire sobre la exactitud de la medida de la variación de entalpía. Si se considera el primer parámetro, se observa el efecto principal de la reducción de la incertidumbre asociado a la disminución del error relativo en el cálculo de la variación de temperatura del aire entre la entrada y la salida ($\delta T_a/\Delta T_a$). Por otro lado, la precisión en la lectura del caudal volumétrico condiciona de manera directa la exactitud de la medida. Así pues, se ha seleccionado el caudal máximo permitido en la instalación (8 l/min) y, para el caso concreto del análisis del PCM GR31, una temperatura del aire de entrada superior a 50°C .

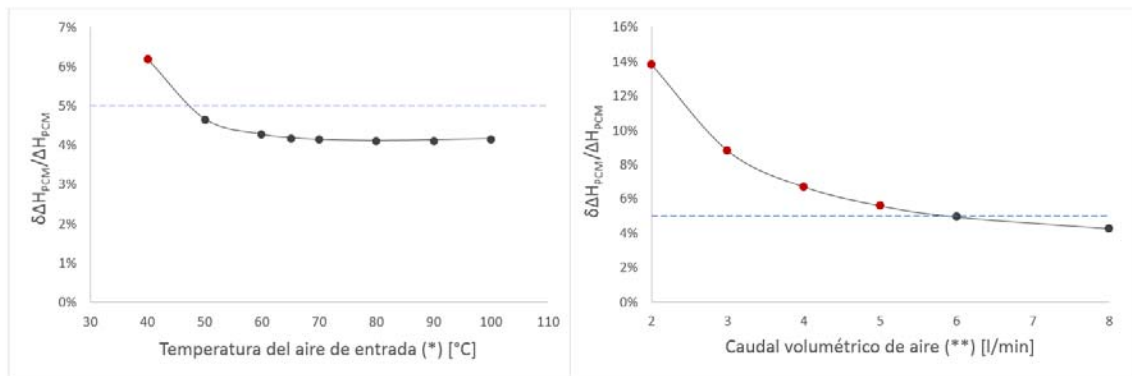


Fig. 3. 12. Influencia de la temperatura del aire de entrada y del caudal volumétrico en la exactitud de la medida del incremento de entalpía del PCM. (*) Cálculos realizados tomando $q=8\text{l/min}$ y $L_b=50\text{mm}$; (**) cálculos realizados con $T_{a,e}=60^\circ\text{C}$ y $L_b=50\text{mm}$.

Por otro lado, la figura 3.13 muestra la repercusión de la longitud del lecho en la exactitud del método y en la duración del ensayo. Se puede observar el incremento de la desviación vinculado al aumento de las pérdidas para longitudes altas del lecho. En este caso, si se emplean longitudes comprendidas entre los 30 y 100mm se puede obtener una medida con una incertidumbre inferior a $\pm 5\%$ con unos tiempos de ensayo razonables (5-15 minutos).

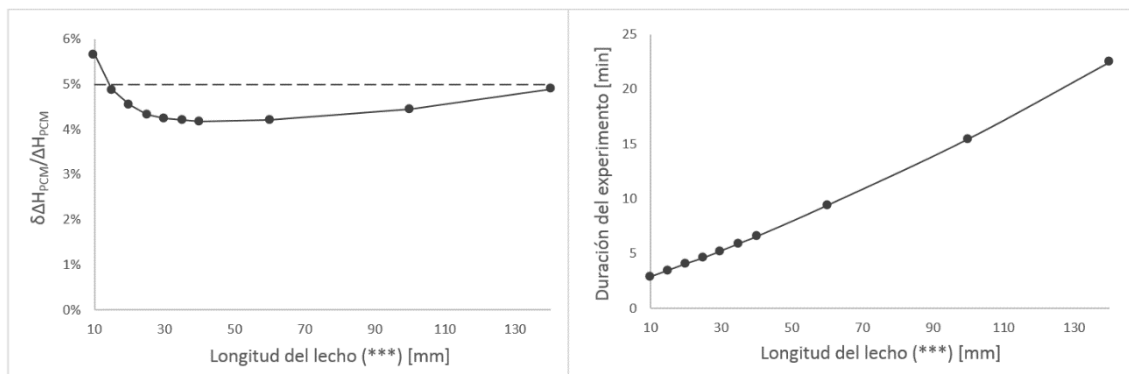


Fig. 3. 13. Influencia de la longitud del lecho en la exactitud y la duración del experimento. (***) Cálculos realizados para $q=8l/min$ y $T_{a,e}=60^{\circ}C$.

3.5.4. Resultados experimentales

Se han ensayado con la metodología experimental descrita muestras de los granulados GR31 y GR42. En este caso, el compuesto GR27 se ha excluido del análisis debido a que la instalación experimental no puede trabajar con temperaturas inferiores a la del ambiente ($25^{\circ}C$). En la siguiente figura (fig. 3.14) se muestra la evolución de las temperaturas y el cálculo de las contribuciones al balance de energía en uno de los ensayos realizados (GR31-E3).

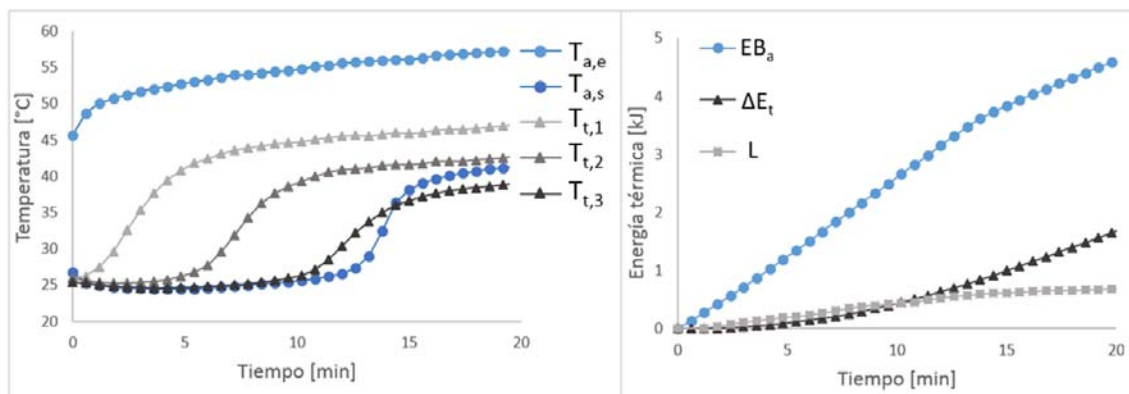


Fig. 3. 14. Evolución de las temperaturas (izq.) y cálculo de las principales contribuciones al balance de energía (der.) correspondientes al ensayo GR31-E3.

La tabla 3.8 presenta los principales datos obtenidos en la experimentación de estos compuestos. En cada ensayo se ha calculado la propagación de incertidumbres a través de los cálculos del método según el procedimiento descrito en el apartado 3.5.2 (Ec. 51-54). En este análisis aplicado sobre los datos experimentales se ha introducido una fuente de incertidumbre adicional correspondiente a la falta de uniformidad en la temperatura registrada en la salida del lecho. Se ha asumido que el error en la estimación de la temperatura promedio en la sección de salida está acotado por las temperaturas máxima y mínima registradas en esta región (Ec. 58). Este fenómeno es más acentuado en los experimentos realizados con el compuesto GR42, llevados a cabo con una temperatura de la corriente de aire superior. De este modo, el cálculo de la propagación de incertidumbres

estima una desviación de en torno al ± 5 y $\pm 7\%$ para los ensayos realizados con GR31 y GR42 respectivamente. Por otro lado, la reproducibilidad del valor estimado a partir de los datos de los distintos ensayos es aceptable: la desviación observada en el conjunto de experimentos es inferior al $\pm 5\%$.

$$e_{BE_a}|_{\delta T_o} = \frac{T_{a,s}|_{max} - T_{a,s}|_{min}}{2 \cdot (T_{a,e} - \bar{T}_{a,s})} \quad Ec. 58$$

Material		m _{PCM} [g]	Δh _{PCM} [kJ/kg]	ΔT _{PCM} [°C]	T _{a,i} [°C]	T _∞ [°C]	Ḃ [l/min]
E1	GR31	27,65	77,9±4,1	[24,8-47]	57,3	25,5	7,5
E2	GR31	27,63	77,2±4,3	[24,4-46,3]	55,3	24,5	7,5
E3	GR31	27,65	76,0±4,3	[24,8-48,5]	57,5	24,7	7,5
E1	GR42	26,94	86,5±6,5	[25,3-54,5]	64,3	25,2	7,5
E2	GR42	27,64	80,0±4,5	[25,0-56,4]	66,2	25,5	7,6
E3	GR42	27,64	83,4±5,8	[25,4-55,5]	69,1	24,9	7,6
Reproducibilidad Δh _{PCM} (σ _{Δh,GR31} =1,0kJ/kg; σ _{Δh,GR42} =3,3kJ/kg)							

Tabla 3. 8. Resultados en los ensayos realizados en la instalación de balances de energía.

Finalmente, en la tabla 3.9 se muestra el análisis de sensibilidad llevado a cabo sobre los datos experimentales del ensayo E1-GR31. Esta información puede resultar útil para el planteamiento de mejoras en la instalación que permitan reducir las desviaciones en los resultados. Se observa la preponderancia del error asociado al cálculo de la diferencia de temperaturas de la corriente de aire entre la entrada y la salida, si bien la influencia de la medida del caudal volumétrico es significativa y la contribución de la medida de la temperatura superficial del conducto no resulta despreciable (debido a las pérdidas y a la variación de energía térmica que experimenta este elemento). La utilización de una termopila para la medida de la variación de temperatura de la corriente de aire y la incorporación del equipo de control de flujo de aire de mayor precisión (Bronkhorst, EL-FLOW), son modificaciones inmediatas que permitirían mejorar la exactitud de la instalación hasta aproximadamente un $\pm 3\%$.

Medida	Incertidumbre	Sensibilidad $\frac{\sigma_{x_i}}{\sigma_{\Delta h_{PCM}}} \cdot \left \frac{\partial(\Delta h_{PCM})}{\partial x_i} \right $
T _{a,e} -T _{a,s}	±0,6°C	0,74
\bar{T}_s	±0,3°C	0,29
T _{amb}	±0,5°C	0,28
δḂ	±0,18l/min	0,49
δC _{p,vid} /C _{p,vid}	±5%	0,27
δ(Δh _{PCM})/Δh _{PCM}	±5,3%	

Tabla 3. 9. Resumen del análisis de propagación de incertidumbres y de sensibilidad realizado sobre los datos experimentales del ensayo T1-GR31.

3.5.5. Comparación de los resultados

En este apartado se comparan los resultados con las medidas realizadas mediante la metodología T-history. En la figura 3.15 se muestra este contraste particularizado para el compuesto GR31. Debido a que en los ensayos llevados a cabo en la instalación T-history no es posible alcanzar temperaturas superiores a 45°C, se ha realizado una extrapolación de la curva (en línea discontinua).

En relación a los resultados de la instalación de balances de energía, la medida directa extraída de los ensayos T-history sobreestima el incremento de entalpía en un 15%. En cambio, si se aplica la corrección basada en el análisis teórico descrito en el la sección 3.2 ($Bi_{PCM}=h \cdot R / (2 \cdot \lambda)=0,1$) la diferencia entre las dos estimaciones es cercana al 5% y está comprendida dentro del rango de incertidumbre asociado a ambas medidas experimentales.

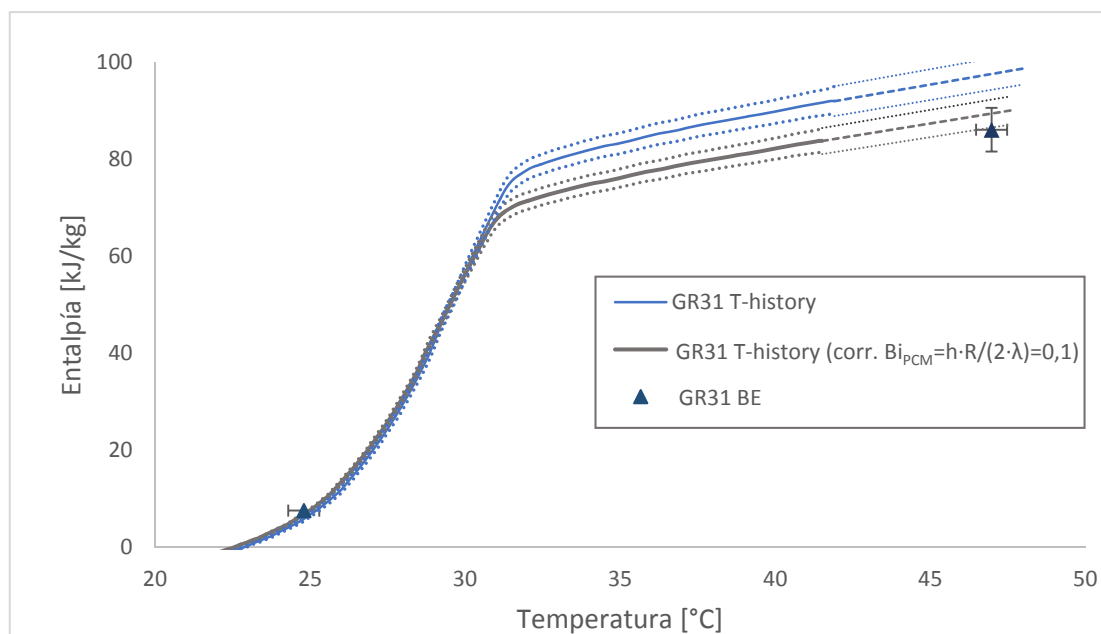


Fig. 3.15. Comparación para el compuesto GR31 de los datos experimentales obtenidos (T-history e instalación de balances de energía).

La figura 3.16 muestra la comparación de los datos experimentales del compuesto GR42 con los presentados por Rady et al. (2009) (T-history) y con la medida de la curva entalpía-temperatura realizada mediante DSC en la Universidad de Zaragoza (velocidad del ensayo 0,5K/min). De nuevo se observa la sobreestimación que produce la medida directa obtenida por el T-history, mientras que si se aplica la corrección, los resultados concuerdan de manera razonable.

Pese a que la curva obtenida a partir de equipo DSC se ajusta al resto de datos, esta observación debe ser tomada con cautela. Sería necesario, profundizar en el análisis de la adecuación de esta metodología para la determinación de la curva entalpía-temperatura de estos materiales granulados. Por un lado, se debe evaluar la representatividad de la medida,

analizando la variabilidad de los resultados obtenidos para distintas muestras, y, por otro lado, resulta conveniente estudiar la influencia de la resistencia térmica de contacto entre el material y el portamuestras en la velocidad de equilibrio de los ensayos.

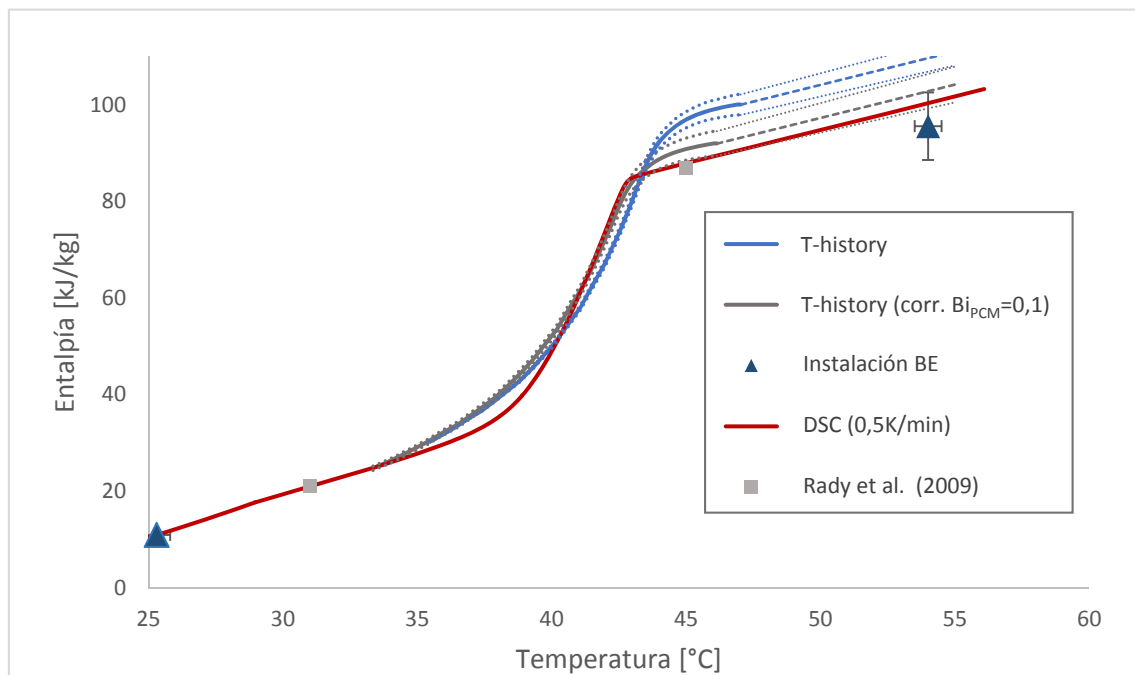


Fig. 3. 16 Intercomparación para el compuesto GR42 de los datos experimentales (T-history e instalación de balances de energía) con los resultados obtenidos mediante DSC (0,5K/min) y con los presentados en trabajos previos (Rady et al. 2009).

3.6. Conclusiones del capítulo

En este capítulo se ha aplicado el método T-history para la determinación de la curva entalpía-temperatura de los compuestos con PCM seleccionados como posibles aditivos para el mortero de suelo radiantes. Previamente, se han realizado análisis teóricos sobre la influencia de las desviaciones en la medida de las temperaturas en los resultados del procedimiento.

En primer lugar, se ha estudiado mediante sendos modelos, analítico y numérico, la repercusión de los gradientes térmicos radiales asociados a la conducción del calor en las muestras en la exactitud del método. El análisis ha permitido no sólo la cuantificación de los errores asociados a la estimación del calor específico y la entalpía y temperatura de cambio de fase, sino la determinación de la relación entre estas desviaciones y los principales números adimensionales que caracterizan las condiciones de los experimentos. Estas relaciones se han plasmado en fórmulas que proporcionan una buena aproximación para estos errores y, por tanto, pueden ser aplicadas para la corrección de los resultados experimentales obtenidos en el ensayo de materiales sólidos con PCM.

Por otro lado, se ha profundizado, con respecto a los análisis presentados en los trabajos anteriores de Zhang et al. (1999) y Rady et al. (2009), en la propagación de incertidumbres a través de los cálculos en los que se basa el método T-history (Marín et al. 2003), teniendo en cuenta las posibles desviaciones en la medida de la temperatura de las

sondas. A partir de un modelo lineal sencillo que describe estos errores de medida, se han obtenido fórmulas que permiten asignar un rango de incertidumbre a la entalpía calculada en cada punto de la curva. La incertidumbre asociada al calor específico es superior a la desviación máxima causada por la existencia de gradientes térmicos en las muestras (5%), por lo que aplicar la corrección, en este caso, resulta irrelevante. Sin embargo, el método T-history produce una estimación más exacta de la entalpía de cambio de fase. Si se tienen en cuenta las desviaciones máximas en la determinación de este valor ocasionadas por los gradientes de temperatura en las muestras, resulta conveniente aplicar la corrección obtenida en el análisis teórico.

Se han realizado medidas complementarias de la variación de entalpía de algunos de los materiales seleccionados con el objetivo de establecer una comparación entre los resultados de ambas metodologías. Estas nuevas medidas están basadas en el estudio del balance de energía aplicado sobre una corriente de aire que, en condiciones controladas de caudal y temperatura, intercambia con un lecho axial de partículas de una material compuesto granulado con PCM. Se ha utilizado la instalación descrita por Dolado et al. (2015) y se han determinado las condiciones experimentales más favorables que propician la obtención de medidas con una mayor exactitud mediante un estudio teórico previo. Los medidas de la variación de entalpía, obtenidas con una exactitud de en torno al $\pm 5\%$, concuerdan con las curvas determinadas mediante el método T-history y corregidas con las correlaciones establecidas en este capítulo.

Los ensayos de solidificación y fusión realizados con el método T-history han mostrado un buen comportamiento de los materiales seleccionados: no se observan fenómenos de subenfriamiento o histéresis significativos, ni se aprecia degradación de su capacidad de almacenamiento térmico tras experimentar 20 ciclos de fusión y solidificación. Sin embargo, en los materiales designados por el prefijo PX (Rubitherm) se ha observado una aglutinación de las partículas que se ha atribuido a un fenómeno de fugado. Debido a esta razón, se han seleccionado los materiales GR (Rubitherm) para la conformación de un mortero de suelo radiante con PCM.

Capítulo 4. Análisis de las propiedades de muestras de mortero y PCM

4.1. Introducción

Este capítulo se ocupa de la descripción del trabajo experimental relacionado con la preparación de las muestras de mortero con PCM y con la posterior determinación de sus propiedades termofísicas. Mediante diferentes metodologías de laboratorio se han obtenido las medidas de la densidad, calor específico y conductividad térmica del material necesarias para la simulación (Capítulo 7) del comportamiento del suelo radiante propuesto. Asimismo, se ha estimado la incertidumbre asociada a dichas medidas como fuente de información complementaria para los mencionados estudios numéricos.

Por último, se presentan los resultados de un estudio del comportamiento frente al fuego de los morteros con PCM. Este trabajo se ha planteado como una colaboración, dentro del marco del proyecto del Plan Nacional (ENE2011-28269-C03-01), del Laboratorio del Fuego de la Escuela Politécnica de la Edificación de Barcelona (Universidad Politécnica de Cataluña).

4.2. Preparación de las muestras

Se utilizó un cemento CEMII/B-L 32,5N para la preparación de las muestras. La dosificación de cemento empleada (350kg/m^3) se determinó a partir de las prescripciones de la norma francesa DTU 65.14 (2006) y de las recomendaciones de algunos fabricantes (p. ej. Uponor) para la formulación de morteros de recrecido para suelos radiantes. La relación agua cemento fue de 0,55. Se utilizó como árido arena fina.

A partir de esta formulación del mortero de referencia se elaboraron las composiciones que incluían el PCM granulado (GR27). El criterio utilizado para su elaboración fue sustituir la masa de árido por una cantidad de igual peso de PCM. En la tabla 4.1 se muestra la composición de los morteros preparados. El contenido de PCM (10% y 25% en masa, sobre base seca) en las muestras se determinó según los resultados de los primeros cálculos realizados mediante el modelo numérico, descrito en el capítulo 5, publicados en Mazo et al. (2012) y Mazo et al. (2012b).

Se conformaron distintas probetas de forma prismática de $100\times 100\times 150\text{mm}$ y $45\times 100\times 150\text{mm}$. En la figura 4.1 se muestra el aspecto de los tres morteros preparados. Como se observa, las probetas con mayor contenido en PCM adquieren un color más oscuro debido a la impregnación del PCM en fase líquida en el mortero.

Este fenómeno de dispersión del PCM en el material compuesto es en principio negativo, pues indica que los gránulos no son capaces de retenerlo completamente. Sería preciso, en el trabajo futuro ligado al estudio de la viabilidad constructiva de los elementos propuestos, cuantificar este fenómeno y analizar sus consecuencias dentro del sistema de suelo radiante.

Muestra	Cemento [g]	Áridos [g]	GR 27 [g]
0% PCM	343	1393	0
10% PCM	283	972	144
25% PCM	310	809	378

Tabla 4. 1. Composición en seco de las muestras de mortero.

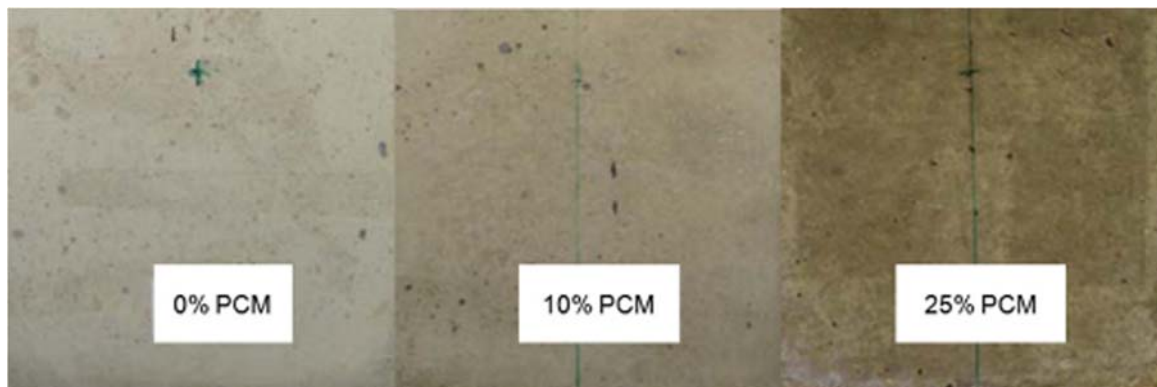


Fig. 4. 1. Imagen comparativa de los tres compuestos de mortero y PCM (GR27).

4.3. Medida de la densidad aparente

Se determinó la densidad aparente de las muestras según el principio de medida expuesto en las normas EN 1015-10 (2000) y EN 12390-7 (2009). En este método, el volumen de la probeta se mide a partir del peso del agua que desaloja (Ec. 1) al ser sumergida en un baño de agua cuya temperatura se encuentra en un intervalo de $\pm 2^\circ\text{C}$. A diferencia del procedimiento descrito en las mencionadas normas, en este caso, la densidad de la muestra no se determina tras un proceso de secado, sino que se admite su contenido de humedad habitual.

El procedimiento de medida es el siguiente:

- determinación del peso de la probeta (m_{muestra})
- inmersión de la probeta y seguimiento de la evolución temporal del peso de la probeta sumergida (la muestra va paulatinamente absorbiendo agua, de manera que la medida aumenta durante un tiempo)
- cuando la diferencia entre dos sucesivas pesadas, realizadas en un intervalo de 15 minutos, difiere menos de un 0,2%, se anota la medida del peso de la probeta sumergida ($m_{\text{muestra, inm}}$). Inmediatamente, se extrae del baño, se seca su superficie y se pesa de nuevo en condiciones normales (sin estar sumergida) la probeta que ha absorbido agua durante el proceso de inmersión ($m_{\text{muestra, hum}}$).

De esta manera, el volumen de la probeta (V_{muestra}) se calcula mediante la ecuación 1.

$$V_{\text{muestra}} = \frac{m_{\text{muestra,hum}} - m_{\text{muestra,inm}}}{\rho_{\text{agua}}} \quad \text{Ec. 1}$$

A partir de esta medida, es inmediata la determinación de la densidad aparente de la probeta (Ec. 2).

$$\rho_{\text{mortero}} = \frac{m_{\text{muestra}}}{v_{\text{muestra}}} = \frac{m_{\text{muestra}} \cdot \rho_{\text{agua}}}{m_{\text{muestra,hum}} - m_{\text{muestra,inm}}} \quad \text{Ec. 2}$$

En la siguiente tabla (tabla 4.2) se muestran los valores de densidad medidos para cada probeta (45x100x150mm) junto con el rango de incertidumbre asociado a la metodología experimental empleada.

Muestra	Contenido en PCM	ρ [kg/m ³]
0PCM-M1	0%	1950 ±8 (±0,4%)
10PCM-M1	10%	1810 ±9 (±0,5%)
25PCM-M1	25%	1610 ±6 (±0,4%)
25PCM-M2	25%	1560 ±6 (±0,4%)

Tabla 4. 2. Medida de la densidad aparente de las probetas.

Como es obvio, la adición de las partículas de material mineral con PCM al mortero provoca una disminución de la densidad aparente del compuesto resultante. Las medidas experimentales se han ajustado por mínimos cuadrados a la aproximación teórica sencilla para la estimación de la dependencia de la densidad con el contenido en PCM que representa la ecuación 3. En ella, x_{PCM} es el porcentaje másico de PCM en el mortero y ρ_{PCM} y ρ_m corresponden, respectivamente, a las densidades del granulado y del resto de componentes (cemento y áridos).

$$\rho_{m-PCM} = \frac{1}{\frac{x_{\text{PCM}}}{\rho_{\text{PCM}}} + \frac{(1-x_{\text{PCM}})}{\rho_m}} \quad \text{Ec. 3}$$

Esta aproximación se basa en la asunción de una densidad constante, en todos los compuestos, del resto de partículas (cemento y áridos) (ρ_m) y de un nivel de porosidad independiente de la cantidad de PCM. El ajuste proporcionado por este modelo teórico simple es razonablemente satisfactorio; se puede establecer un nivel de error asociado del ±3%. Además, los valores de densidad del PCM y del resto de componentes (cemento y áridos) obtenidos a partir de dicho ajuste (*vid.* figura 4.2) concuerdan con la densidad del granulado proporcionada por el fabricante y con la medida del mortero sin PCM. Este modelo para la predicción de la densidad del compuesto, será utilizado en el capítulo 7,

donde se realiza una simulación del funcionamiento de los sistemas de suelo radiante propuestos.

Debido a que no se midió la cantidad de agua retenida en el compuesto, se ha estimado, para la corrección del porcentaje en masa del granulado con PCM, una relación agua-cemento de 0,4, según los resultados acerca de la cantidad de agua requerida para la hidratación completa obtenidos por Powers y Brownnyard (1946).

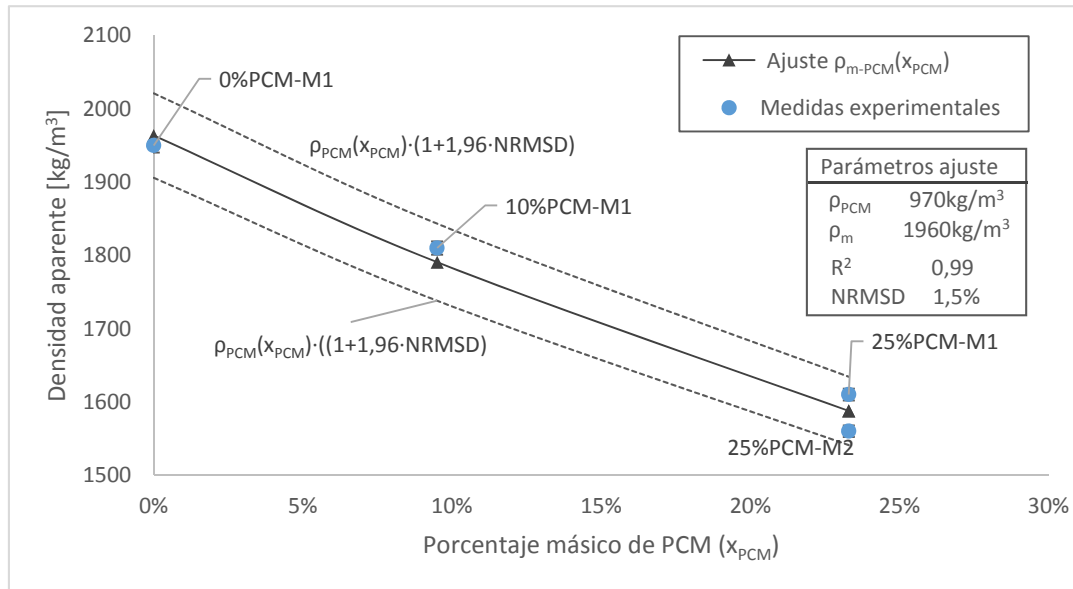


Fig. 4. 2. Dependencia de la densidad aparente del mortero con el porcentaje másico del material granulado con PCM (medidas experimentales y ajuste teórico).

4.4. Análisis de la respuesta térmica de las muestras. Medida de la difusividad térmica del material

Se ha analizado la respuesta térmica de las muestras mediante la modificación, propuesta por Lázaro et al. (2008), aplicada a la instalación experimental desarrollada en la tesis doctoral de Zalba (2002), que permitía la reproducción de las condiciones del problema clásico de transferencia de calor de conducción unidimensional transitoria.

Según este procedimiento, cada muestra se enfrenta a una corriente de aire de temperatura controlada y constante. El resto de superficies se aíslan térmicamente. En la figura 4.3 se ofrece una representación esquemática de dicha disposición. Las probetas ensayadas tienen unas dimensiones de 45x100x150mm ($e_{muestra} \times L_y \times L_z$).

La muestra, que se encuentra a una temperatura inicial T_0 , se expone al mencionado flujo de aire a una temperatura T_a . La temperatura del aire de entrada se mide mediante 3 termorresistencias PT-100 conectadas a cuatro hilos. La temperatura de la probeta se mide en los cinco puntos ($T_1..T_5$) que indica la figura 4.3 por medio de termopares tipo T.

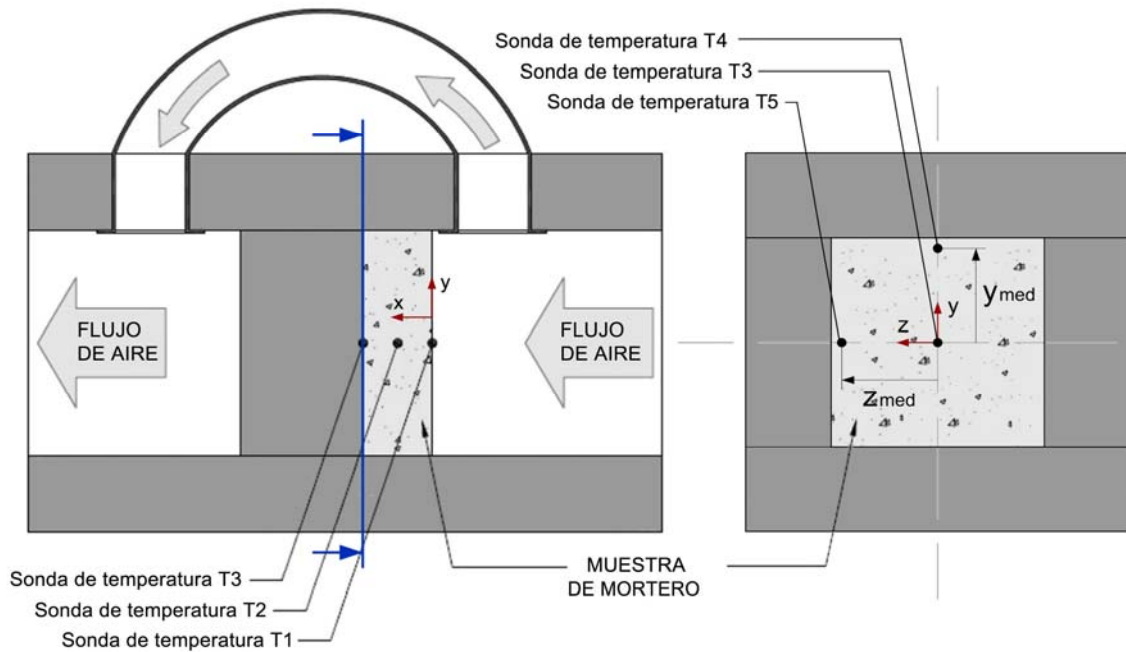


Fig. 4. 3. Disposición experimental (Lázaro et al. 2008, Zalba 2002) para reproducir las condiciones de conducción del calor unidimensional.

En la figura 4.4 se muestra la evolución térmica registrada en los ensayos de los tres morteros a partir de una temperatura inicial del material y de la corriente de aire de 8 y 34°C respectivamente. El efecto del PCM en el comportamiento de la muestra es notable: el proceso de cambio de fase causa un retraso evidente en el tiempo de respuesta. Si se define esta magnitud como el tiempo transcurrido hasta que el sistema alcanza el 90% del salto de temperatura al que se somete, se puede cuantificar en 80 minutos para el mortero convencional y en 150 y 250 minutos para los materiales con un 10 y 25% de material granulado. Es preciso señalar que el tiempo de respuesta de este sistema físico depende tanto de las condiciones de contorno como, en el caso de que contenga PCM, de los niveles térmicos. No se trata, por tanto, de una característica del material o de la probeta, de modo que la comparación de esta magnitud se debe limitar a este caso concreto.

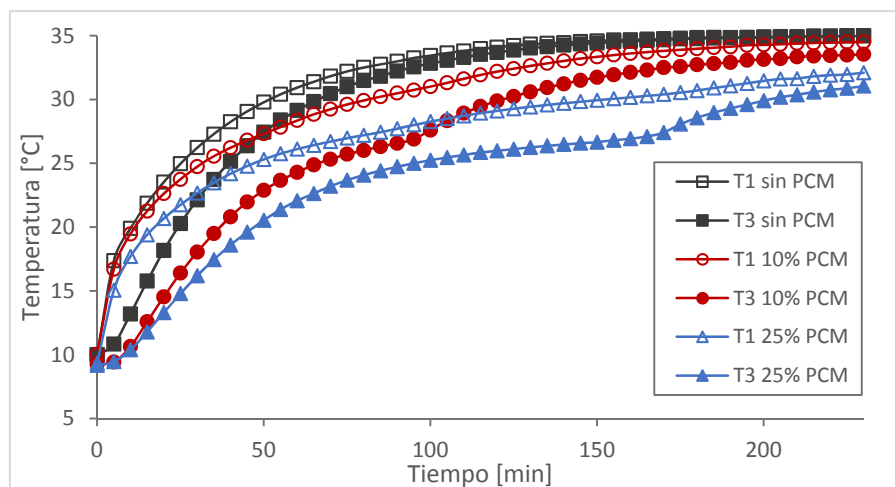


Fig. 4. 4. Evolución de la temperatura de las probetas (puntos 1 y 3) durante los ensayos.

Por otro lado, partir de la evolución de la temperatura de los distintos puntos, se puede estimar la difusividad térmica (α) del material. Esta estimación se basa en la identificación de los principales parámetros de la dinámica del problema clásico de transferencia de calor transitoria unidimensional a través de una placa plana aislada en un extremo. El análisis es válido sólo en la zona de comportamiento lineal de material, es decir, cuando su temperatura está por debajo del rango asociado al cambio de fase.

Así pues, la solución analítica del problema permite la predicción de la evolución de la temperatura de los distintos puntos de la probeta (Incropera et al. 2007). Las ecuaciones 4 y 5 representan esta variación temporal. En ellas se ha utilizado la aproximación de primer término de la serie (válida para $Fo > 0,2$, lo cual implica que en el caso más desfavorable se puede utilizar si se cumple que $t > 900s$).

$$T_1 = T_a + (T_0 - T_a) \cdot C_1 \cdot \cos(\xi_1) \cdot e^{-\xi_1^2 \cdot \frac{\alpha}{L^2} \cdot t} \quad Ec. 4$$

$$T_3 = T_a + (T_0 - T_a) \cdot C_1 \cdot e^{-\xi_1^2 \cdot \frac{\alpha}{L^2} \cdot t} \quad Ec. 5$$

Donde ξ_1 es el primer valor propio del problema, es decir, la primera solución de la ecuación trascendental (Ec. 6). La relación entre C_1 y ξ_1 se define en la ecuación 7.

$$\xi_1 \cdot \tan(\xi_1) = Bi \quad Ec. 6$$

$$C_1 = \frac{4 \cdot \text{seno}(\xi_1)}{2 \cdot \xi_1 + \text{seno}(2 \cdot \xi_1)} \quad Ec. 7$$

El valor de ξ_1 se puede obtener de los resultados experimentales por medio de la siguiente relación (Ec. 8):

$$\cos(\xi_1) = \frac{T_a - T_1}{T_a - T_3} \quad Ec. 8$$

A partir de este principio de medida, se ha propuesto un procedimiento más elaborado para tratar los datos experimentales. El objetivo de este algoritmo es considerar los efectos tridimensionales de la transferencia de calor que tienen una influencia apreciable en la dinámica de la probeta. La existencia de estos fenómenos es previsible, pues no se cumple, para la geometría de la probeta, que $e_{\text{muestra}} \ll L_y / 2$ o $e_{\text{muestra}} \ll L_z / 2$. Para poder realizar la evaluación de estos efectos, se realiza la medida en dos puntos adicionales de la superficie aislada opuesta a la corriente de aire (T_4 y T_5 , Fig. 4.3).

El algoritmo se fundamenta en el ajuste de la solución analítica al problema de transferencia de calor tridimensional (que se puede expresar como producto de las

soluciones parciales en cada dirección: $\theta(x,y,z,t) = \theta_x(x,t) \cdot \theta_y(y,t) \cdot \theta_z(z,t)$, Incropera et al. (2007) a los datos empíricos. El procedimiento se describe a continuación.

En primer lugar, se selecciona el intervalo temporal en el que se analiza la respuesta. Los criterios de selección son los siguientes:

- el comienzo del intervalo (t_1) está sujeto a la condición para el número de Fourier asociado al espesor de la probeta ($Fo_x = \alpha \cdot t / e_{muestra}^2 > 0,2$) que delimita el rango de validez de la aproximación de primer término para la solución analítica correspondiente a la dinámica dominante del sistema térmico
- por otro lado, la temperatura del instante final del periodo de análisis (t_2) debe ser menor a la del comienzo de la fusión en el PCM. En el caso de la probeta de mortero convencional, este segundo criterio se transforma en la necesidad de obtener una exactitud aceptable en la medida de las temperaturas adimensionales, teniendo en cuenta la incertidumbre de los termopares ($\pm 0,5^\circ\text{C}$).

Posteriormente, se calculan los valores propios (ξ_j) relacionados con la transferencia de calor en las direcciones transversales (y, z) (Ec. 9). La ecuación 9, expresada en forma implícita, puede ser, en estos casos, aproximada por el primer término de la serie, ya que los números de Biot asociados a las dos direcciones transversales son bajos y el efecto del segundo término es residual ($C_2 \ll C_1$).

$$\frac{T_a - T_p}{T_a - T_3} = \frac{C_{1,j} \cdot \cos\left(2 \cdot \frac{\xi_{1,j} \cdot x_{med,j}}{L_j}\right) \cdot e^{-\xi_{1,j}^2 \cdot 4 \cdot \frac{\alpha}{L_j^2} t_2} + C_{2,j} \cdot \cos\left(2 \cdot \frac{\xi_{2,j} \cdot x_{med,j}}{L_j}\right) \cdot e^{-\xi_{2,j}^2 \cdot 4 \cdot \frac{\alpha}{L_j^2} t_2}}{C_{1,j} \cdot e^{-\xi_{1,j}^2 \cdot 4 \cdot \frac{\alpha}{L_j^2} t_2} + C_{2,j} \cdot e^{-\xi_{2,j}^2 \cdot 4 \cdot \frac{\alpha}{L_j^2} t_2}} \approx \cos\left(2 \cdot \frac{\xi_{1,j} \cdot x_{med,j}}{L_j}\right) \quad j=y,z; p=4,5 \quad Ec. 9$$

A continuación se presentan aquellas ecuaciones que, si se tienen en cuenta las medidas experimentales disponibles, están formuladas a partir de relaciones redundantes (Ec. 10-12). Dada esta característica, se definen los siguientes errores asociados (e_i).

$$e_1 = \cos(\xi_1) - \frac{\overline{T_a - T_1}}{\overline{T_a - T_3}} \quad Ec. 10$$

$$e_2 = \cos\left(\frac{\xi_1}{2}\right) - \frac{\overline{T_a - T_2}}{\overline{T_a - T_3}} \quad Ec. 11$$

$$e_3 = \frac{\int_{t_1}^{t_2} (\theta_3 - \hat{\theta}_3) \cdot dt}{t_2 - t_1} \quad Ec. 12$$

En la ecuación 12, θ_3 y $\hat{\theta}_3$ son, respectivamente, el valor medido y el estimado mediante la solución analítica -en producto ($\theta_x \cdot \theta_y \cdot \theta_z$)- de la temperatura adimensional del punto 3 (fig. 4.3). Los errores de estas tres ecuaciones se minimizan utilizando la siguiente función objetivo (z, Ec. 13):

$$z = e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 \quad \text{Ec. 13}$$

Este problema de optimización no lineal se ha resuelto haciendo uso del programa de resolución de ecuaciones EES (Klein 2003).

En la siguiente tabla (tabla 4.3) se muestran los resultados obtenidos en los ensayos realizados a las tres muestras. Asimismo, la tabla muestra la calidad (R^2 , RMSD, $\overline{\delta T}$) del ajuste para el conjunto de temperaturas medidas ($T_1..T_5$) en el intervalo de análisis. La desviación cuadrática media (RMSD) se calcula a partir de las temperaturas adimensionales.

Muestra	Contenido en PCM	Difusividad [mm^2/s]	R^2 (*)	RMSD (*)	$\overline{\delta T}$ [$^{\circ}\text{C}$] (*)
OPCM-M1-EI	0%	0,74	0,998	1,1%	$\pm 0,5$
OPCM-M1-EII	0%	0,76	0,999	0,7%	$\pm 0,3$
OPCM-M1-EIII	0%	0,72	0,998	1,2%	$\pm 0,6$
10PCM-M1-EI	10%	0,54	0,994	1,8%	$\pm 0,9$
10PCM-M1-EII	10%	0,53	0,980	3,3%	$\pm 1,5$
25PCM-M2-EI	25%	0,48	0,997	1,3%	$\pm 0,6$
25PCM-M2-EII	25%	0,46	0,999	0,8%	$\pm 0,3$
25PCM-M2-EIII	25%	0,45	0,997	1,3%	$\pm 0,6$

Tabla 4. 3. Medidas de la difusividad térmica de las probetas. (*) Coeficiente de correlación y errores asociados al ajuste que del modelo al conjunto de temperaturas registradas durante el periodo de análisis (t_1 , t_2).

Como se observa, el ajuste del modelo analítico planteado es satisfactorio. El rango de los errores, expresados en temperatura, es comparable a la exactitud que proporcionan los termopares ($\pm 0,5^{\circ}\text{C}$). Por otro lado, la repetibilidad de las medidas es de $\pm 3\%$.

Por último se ha realizado un análisis de propagación de incertidumbre a través del algoritmo matemático presentado, teniendo en cuenta las desviaciones de las variables que intervienen en los cálculos. La sensibilidad respecto a cada parámetro de entrada se ha calculado numéricamente de forma independiente ($\Delta\alpha/\Delta x_i$, *one-at-time*, Saltelli 2004). En la tabla 4.4 se muestran las desviaciones consideradas en el análisis, así como la sensibilidad de la estimación de la difusividad con respecto a cada variable. La propagación de los errores de las medidas experimentales produce una incertidumbre de $\pm 10\%$ en la estimación de la difusividad. El análisis de sensibilidad identifica a la medida de la temperatura en el centro de la superficie aislada (T_3) como la variable cuya desviación tiene mayor peso en la incertidumbre de los resultados.

Medida	Incertidumbre	Sensibilidad
		$\frac{\delta x_i}{\delta \alpha} \cdot \left \frac{\Delta \alpha}{\Delta x_i} \right $
T ₁	±0,5°C	0,85
T ₂	±0,5°C	0,17
T ₃	±0,5°C	0,24
T ₄	±0,5°C	0,19
T ₅	±0,5°C	0,03
e _{muestra}	±1mm	0,37
x _{T2}	±2mm	0,07
δ α /α	±10%	-

Tabla 4. 4. Resumen del análisis de propagación de incertidumbres a través del algoritmo de tratamiento de datos empíricos.

4.5. Medida de la efusividad y de la conductividad térmica

Se solicitó la medida de la efusividad ($e=(\lambda \cdot \rho \cdot c_p)^{1/2}$) y la conductividad térmica de las muestras al Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón (ICMA), donde se utilizó, para este propósito, el equipo TCi fabricado por C-Therm. Este dispositivo basa su principio de medida en el método modificado de fuente plana transitoria, a su vez, desarrollado a partir del originalmente propuesto por Gustafsson (1991).

Las medidas se obtienen a partir del análisis de la respuesta sistema térmico material-sensor como sólidos semi-infinitos cuando en la frontera entre ambos medios se genera un flujo de calor constante en el sensor. Dicho sensor está formado por una termorresistencia, de tal forma que su respuesta térmica se puede estudiar a través de la evolución temporal de la diferencia de potencial eléctrico entre sus extremos. Dadas las características de la dinámica de los sólidos semi-infinitos, la evolución temporal de este voltaje responde a la siguiente ecuación (Ec. 14).

$$\Delta V(t) = m \cdot \sqrt{t} \quad \text{Ec. 14}$$

El parámetro m de la curva definida por la ecuación 14 se relaciona de manera directa con la efusividad del material. El efecto del sensor sobre esta medida se corrige mediante una curva de calibración. Asimismo, a través de una segunda calibración, descrita en la patente US6676287B1 (2004), se puede relacionar este parámetro dinámico de la respuesta medida con la conductividad térmica para diferentes familias de materiales.

Las principales ventajas del método están relacionadas con su simplicidad en la aplicación: no precisa de muestras diseñadas *ad hoc* y requiere unos tiempos de ensayo cortos; y con su flexibilidad: puede ser aplicado a materiales sólidos, líquidos y pastas. Ha sido aplicado para la medida de la conductividad térmica de materiales de construcción como aislantes (Coz Díaz y Álvarez Rabanal 2011), yesos, maderas (Cha et al. 2012) u

hormigones (Harris et al. 2013, Coz Díaz y Álvarez Rabanal 2011, Kim et al. 2013, Borinaga-Treviño et al. 2013). Además, dentro del ámbito de la investigación sobre materiales de construcción con PCM ha sido empleado por Kim et al. (2014) para la determinación de la conductividad térmica de morteros con PCM y por Jeong et al. (2013) y (2014) para la caracterización de compuestos minerales (diatomita y nitrato de boro, respectivamente) con PCM impregnado.

En los trabajos de Coz Díaz y Álvarez Rabanal (2011) y Cha et al. (2012) se realiza la comparación de las medidas del método con las proporcionadas por la metodología de placa caliente guardada para la misma muestra de material. Cha et al. (2012) obtuvieron una correlación aceptable entre los resultados de ambos equipos para distintas muestras de materiales de madera y placas de yeso. Por su parte, Coz Díaz y Álvarez Rabanal (2011) observaron buena concordancia en las medidas realizadas sobre muestras de hormigón convencional (menores al 10%). Sin embargo, las desviaciones resultantes de los ensayos realizados a muestras de hormigón ligero fueron relevantes (20%). Estos errores pueden ser debidos al elevado grado de heterogeneidad de la muestra. En los resultados experimentales de los trabajos presentados se observan desviaciones de entre el $\pm 5\%$ (Coz Díaz y Álvarez Rabanal 2011) y el $\pm 10\%$ (Harris et al. 2013) asociadas a la heterogeneidad de la muestra (medidas en distintos puntos).

4.5.1. Metodología

Las medidas de la efusividad y conductividad térmica se han realizado sobre las superficies lisas de las probetas conformadas. El contacto térmico adecuado se asegura mediante el uso de un agente de contacto para medida en cerámicas (Wakefield 120).

En primer lugar, se estudió la influencia de la heterogeneidad del material a través de la realización de medidas en tres puntos de las probetas con PCM (10 y 25%). Se detectaron unos errores máximos del $\pm 10\%$. Estos resultados concuerdan con los presentados en los trabajos de Coz Díaz y Álvarez Rabanal (2011) y Harris et al. (2013). En cambio la variabilidad del valor del calor específico, calculado a partir de la densidad aparente del material, con respecto al punto de medida es mucho menor. Los errores en esta magnitud oscilan entre un $\pm 2\%$.

Se estudió la influencia de la temperatura en las medidas de conductividad realizando medidas a 9 y 40°C sobre la muestra de mortero de referencia y la que contenía un 25% de PCM. Estas medidas se realizaron en un horno de temperatura controlada. Se dejó un tiempo de 2 horas para la estabilización de las temperaturas.

4.5.2. Medidas experimentales

En la tabla 4.5 se resumen las medidas realizadas sobre las muestras. Se observa la influencia del contenido de PCM en la reducción de la conductividad térmica equivalente del compuesto. El calor específico, por el contrario, aumenta levemente al incrementar esta proporción másica. Por otro lado, la influencia de la temperatura en la conductividad

térmica del material es leve (menor al 5% para la muestra de referencia en el intervalo comprendido entre 9 y 40°C).

Muestra	x _{PCM} [%]	Temperatura [°C]	e [J/(K·m ² ·s ^{1/2})]	λ [W/(m·K)]	c _p [J/(kg·K)] (*)
0PCM-M1	0%	21,9	1576	1,31	969
0PCM-M1	0%	40,5	1543	1,25	976
0PCM-M1	0%	9,3	1575	1,31	973
10PCM-M1	10%	22,0	1439	1,08	1055
25PCM-M2	25%	39,6	1190	0,84	1082
25PCM-M2	25%	9,3	1203	0,85	1088

Tabla 4. 5. Resumen de las medidas realizadas en el ICMA con el equipo TCi a las probetas de mortero. (*) El calor específico se calcula a partir de las medidas de conductividad, efusividad (TCi) y densidad aparente (sección 4.3).

4.6. Análisis de las medidas de conductividad térmica y del calor específico

En esta sección se analiza la influencia del contenido de PCM en los morteros analizados en la conductividad térmica y el calor específico. En la siguiente tabla (tabla 4.6) se resumen los valores de estas magnitudes, junto con su incertidumbre asociada, bien obtenidos a partir de medidas experimentales directas o bien calculadas a partir de éstas.

Se ha considerado que la principal fuente de incertidumbre en las medidas del dispositivo TCi la constituye el grado de heterogeneidad del material, que ocasiona una cierta variabilidad en las medidas realizadas en distintos puntos. De esta manera, se considerará una desviación de ±10% y ±5%, respectivamente, para la medida de conductividad y efusividad.

La incertidumbre asociada a las magnitudes calculadas a partir de las medidas obtenidas de los dos equipos, TCi e instalación experimental (difusividad térmica α), se calcula a partir de las correspondientes ecuaciones de propagación de incertidumbres (Ec. 15 y 16). Es interesante señalar que esta propagación de errores reduce la incertidumbre original de la medida obtenida de difusividad térmica (±10%).

$$\frac{\delta c_p}{c_p} = \sqrt{\left(\frac{\delta e}{e}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\delta \alpha}{\alpha}\right)^2 + \left(\frac{\delta \rho}{\rho}\right)^2} \quad \text{Ec. 15}$$

$$\frac{\delta \lambda}{\lambda} = \sqrt{\left(\frac{\delta e}{e}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{\delta \alpha}{\alpha}\right)^2} \quad \text{Ec. 16}$$

		TCi	α +TCi	TCi	α +TCi
Muestra	ρ [kg/m ³]	λ [W/(m·K)]	$\lambda=e\cdot\alpha^{1/2}$ [W/(m·K)]	$c_p=e^2/(\lambda\cdot\rho)$ [J/(kg·K)]	$c_p=e\cdot/(\alpha^{1/2}\cdot\rho)$ [J/(kg·K)]
0% PCM-M1	1950±8	1,29±0,13	1,35±0,10	970±30	930±70
10% PCM-M1	1810±9	1,08±0,11	1,05±0,07	1050±30	1090±70
25% PCM-M2	1560±6	0,85±0,08	0,82±0,06	1090±30	1130±70

Tabla 4. 6. Resumen de las propiedades termofísicas de los morteros analizados.

Como se observa, la adición de PCM provoca en ambos casos (10 y 25%) la reducción de la conductividad térmica por debajo de 1,2W/(m·K), valor mínimo exigido por la norma francesa sobre suelos radiantes DTU 65.14 (2006). En el capítulo 7, donde se estudia numéricamente el funcionamiento de estos sistemas, se analiza el efecto de la disminución de esta propiedad.

4.6.1. Influencia del contenido del PCM en la conductividad térmica

Se ha analizado la reducción en la conductividad observada al aumentar el contenido en PCM del mortero mediante la comparación de las medidas experimentales con la predicción de distintos modelos teóricos. Éstos permiten la estimación de la conductividad térmica equivalente de materiales compuestos con partículas dispersas. De esta forma, en las distintas muestras de mortero estudiadas se asume que las partículas con PCM se hallan dispersas en una matriz que mantiene una conductividad térmica idéntica en los tres compuestos. En la tabla 4.7 se muestra la relación de modelos teóricos considerados en este análisis.

Modelo	Ecuación	Breve descripción
Maxwell-Eucken (Maxwell 1954, Eucken 1932)	$\lambda_{comp} = \lambda_m \cdot \left[\frac{\lambda_{PCM} + 2 \cdot \lambda_m + 2 \cdot \phi_{PCM} \cdot (\lambda_{PCM} - \lambda_m)}{\lambda_{PCM} + 2 \cdot \lambda_m - \phi_{PCM} \cdot (\lambda_{PCM} - \lambda_m)} \right]$	-Modelo basado en la solución analítica -Geometría esférica de las partículas -No tiene en cuenta el empaquetamiento máximo
Bruggeman (Bruggeman 1935)	$\left(\frac{\lambda_{PCM} - \lambda_{comp}}{\lambda_{PCM} - \lambda_m} \right) \cdot \left(\frac{\lambda_m}{\lambda_{comp}} \right)^{\frac{1}{3}} = 1 - \phi_{PCM}$	-permite tener en cuenta distintas geometrías de las partículas
Lewis-Nielsen (Lewis y Nielsen 1970)	$\lambda_{comp} = \lambda_m \cdot \frac{1 + A \cdot B \cdot \phi_{PCM}}{1 - B \cdot \psi \cdot \phi_{PCM}}$	-permite tener en cuenta la geometría de las partículas y considera el empaquetamiento máximo
Pal (Pal 2007)	$\left(\frac{\lambda_{comp}}{\lambda_m} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\lambda_{PCM} - \lambda_m}{\lambda_{PCM} - \lambda_{comp}} \right) = \left(1 - \frac{\phi_{PCM}}{\phi_{max}} \right)^{\phi_{max}}$	-tiene en cuenta el empaquetamiento máximo de las partículas

Tabla 4. 7. Relación de modelos utilizados para la predicción de la conductividad térmica.

Los mencionados modelos se han ajustado mediante mínimos cuadrados a los resultados experimentales obtenidos a partir de las dos metodologías descritas (λ : TCi; $\lambda(\alpha, e)$). En la figura 4.5 se muestra este ajuste a los datos experimentales, mientras que en la tabla 4.8 se resumen los principales aspectos de los mencionados ajustes.

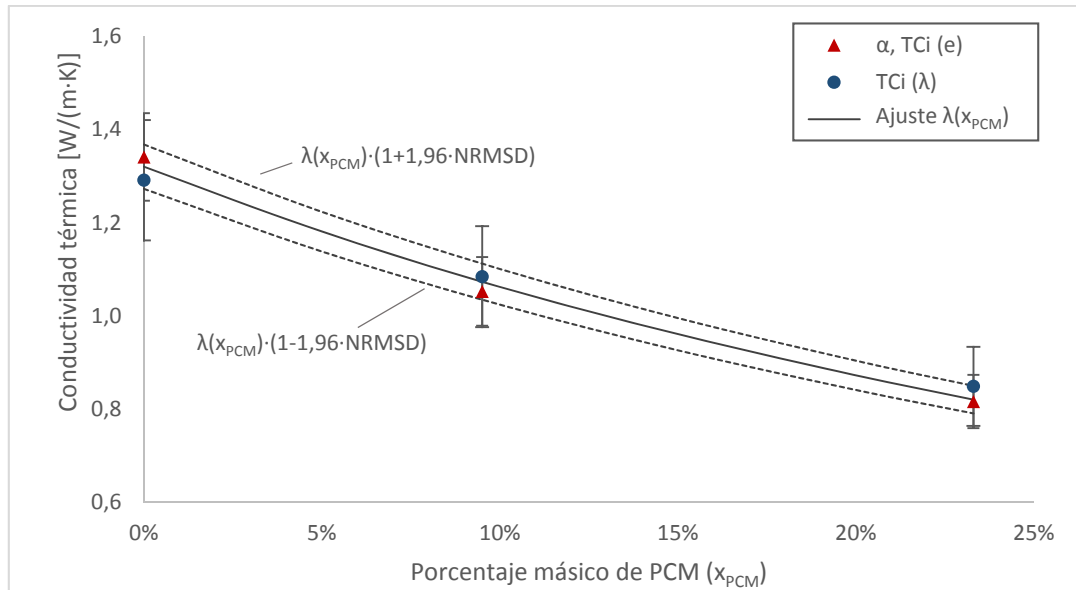


Fig. 4. 5 Ajuste de las medidas experimentales de conductividad térmica.

Los resultados experimentales se ajustan razonablemente ($R^2=0,99$; $NRSME\approx 2\%$) a las medidas experimentales y las curvas que proporcionan distintos modelos son prácticamente idénticas. Se observan diferencias entre la predicción de la conductividad equivalente de material granulado con PCM obtenida a través de cada modelo, que oscila entre los 0,23 y 0,31W/(m·K). No obstante, estos valores son cercanos al valor de conductividad térmica que proporciona el fabricante (0,2W/(m·K)). Las predicciones teóricas que tienen en cuenta el grado de empaquetamiento máximo de las partículas producen estimaciones más altas de la conductividad del aditivo con PCM.

	λ_m [W/(m·K)]	λ_{PCM} [W/(m·K)]	R^2	NRMSD [%]
Maxwell-Eucken	1,32	0,23	0,995	1,9%
Bruggeman	1,32	0,26	0,995	1,9%
Lewis-Nielsen	1,32	0,30	0,995	1,9%
Pal	1,32	0,31	0,997	1,2%

Tabla 4. 8. Principales datos de los ajustes obtenidos con cada modelo.

4.6.2. Influencia del contenido en PCM en el calor específico

Finalmente, se ha estudiado la variación del calor específico de los compuestos formulados con el contenido en PCM. En la figura 4.6 se muestra esta influencia y el ajuste que se ha propuesto para explicar el efecto de la adición del material granulado sobre el mortero. Dicho ajuste se basa en la predicción que proporciona la ecuación 17, mediante la cual, el calor específico se calcula como el promedio, ponderado a la fracción másica, de sus dos componentes principales: mortero y material granulado con PCM. Se considerará en estos cálculos que el calor específico equivalente de la masa de mortero (cemento+agregados) no varía en las tres formulaciones analizadas. Los datos se ajustan razonablemente ($R^2=0,88$, $NRMSD=3,6\%$) al modelo propuesto. Además el calor específico

equivalente del granulado calculado a través del ajuste concuerda con el valor proporcionado por el fabricante (1500J/(kg·K)) y el medido experimentalmente (T-history, Tabla 3.6, 1700±200J/(kg·K)).

$$c_{p,m-PCM} = x_{PCM} \cdot c_{p,PCM} + (1 - x_{PCM}) \cdot c_{p,m} \quad Ec. 17$$

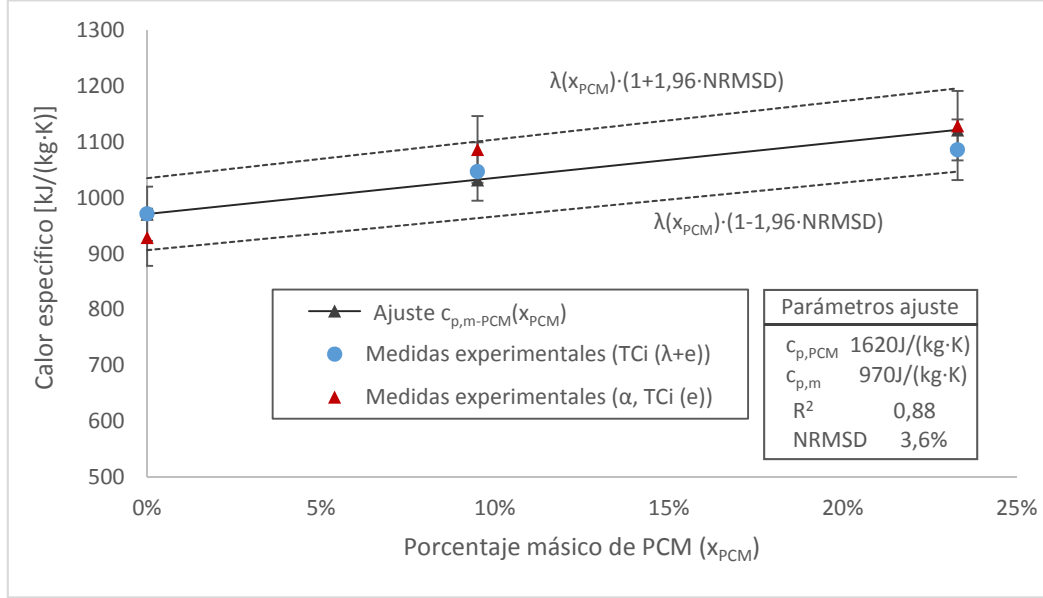


Fig. 4. 6. Influencia de la cantidad de PCM en el calor específico del compuesto.

4.7. Evaluación de la capacidad de almacenamiento del material compuesto de mortero y PCM

En esta sección se analiza la capacidad de almacenamiento de los compuestos obtenidos. Debido a que no se dispone de una medida directa de la curva entalpía-temperatura del compuesto, se propone la evaluación de la curva equivalente del material a partir de la ecuación 18. La expresión está basada en dos principales suposiciones: en primer lugar, se asume que no existe interacción química entre los componentes del mortero que deteriore la capacidad de almacenamiento del PCM y, en segundo lugar, se considera que durante el proceso de mezcla y amasado de los materiales no ha habido fuga del material.

$$h(T) = h_0 + x_{PCM} \cdot (h_{PCM}(T) - h_{PCM,0}) + (1 - x_{PCM}) \cdot c_{p,m} \cdot (T - T_0) \quad Ec. 18$$

Con el objetivo de realizar un primer contraste de esta suposición se ha planteado la realización de la comparación de los resultados experimentales obtenidos en la instalación de balances de energía modificada (Lázaro et al. 2008, Zalba 2002; analizados

en la sección 4.4), en los que se apreciaba de forma clara el efecto del proceso de cambio de fase, con la predicción numérica en la que se han utilizado las propiedades medidas en este capítulo y la curva entalpía-temperatura del material granulado (GR27) determinada en el capítulo 3 (sección 3.4).

En esta comparación se ha tenido en cuenta la propagación de incertidumbres a través del modelo. En la tabla 4.9 se presenta el conjunto de variables de entrada para la herramienta de simulación junto con el intervalo de incertidumbre asociado. Es preciso destacar que algunas de las desviaciones de las propiedades termofísicas del material y de las magnitudes relacionadas con las condiciones del experimento no son independientes. Esta relación debe ser tomada en cuenta en el cálculo de propagación de incertidumbres. En la misma tabla (tabla 4.9) se detalla la dependencia entre las pequeñas desviaciones, dentro del rango de incertidumbre, de las variables. A partir de estas relaciones se han tomado las siguientes variables aleatorias independientes en el análisis: $\delta h_m/h_m$, δT_m , $\delta \xi/\xi$, $\delta e/e$, $\delta e_{muestra}/e_{muestra}$, δT_0 y δT_{aire} . El cálculo de propagación de incertidumbres se ha realizado mediante el método de análisis Montecarlo descrito en el capítulo 6, en el que, además, se considera que las variables independientes aleatorias se ajustan a una distribución gaussiana.

Magnitud	Valor	Medida	Cálculo incertidumbre
Propiedades del material	$h(T)$	-	T-history $\delta h_m/h_m = \pm 4\%$ (sección 3.3, Capítulo 3) $\delta T_m = \pm 0,2^\circ\text{C}$
	c_p	$930 \pm 70 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	$TCi + \alpha$ $\delta c_p/c_p = \delta e/e - 1/2 \cdot \delta \alpha/\alpha$ $(\delta \alpha/\alpha \approx 2 \cdot \delta L/L - 2 \cdot \delta \xi/\xi)$
	λ	$0,82 \pm 0,06 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	$TCi + \alpha$ $\delta \lambda/\lambda = \delta e/e + 1/2 \cdot \delta \alpha/\alpha$
	ρ	$1560 \pm 8 \text{ kg}/\text{m}^3$	Báscula hidrostática -
Condiciones de los ensayos	$e_{muestra}$	$45 \pm 1 \text{ mm}$	Calibre -
	T_0	$8,5 \pm 0,3^\circ\text{C}$	3 termopares tp. T $n^{-1/2} \cdot 0,5^\circ\text{C}$
	T_{aire}	$32 \pm 0,3^\circ\text{C}$	3 termopares tp. T $n^{-1/2} \cdot 0,5^\circ\text{C}$
	h_{conv}	$26 \pm 4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	Insatación Zalba (2002) y Lázaro et al. (2008) $\delta h_c/h_c = \delta e/e + \xi/\cos(2 \cdot \xi) \cdot \delta \xi/\xi$
Variables aleatorias independientes: $\delta h_m/h_m = \pm 4\%$; $\delta T_m = \pm 0,2^\circ\text{C}$; $\delta \xi/\xi = \pm 6\%$; $\delta e/e = \pm 5\%$; $\delta L/L = \pm 2\%$; $\delta T_0 = \delta T_{aire} = \pm 0,3^\circ\text{C}$			

Tabla 4. 9. Incertidumbre de las variables de entrada introducidas en el modelo.

A modo de ejemplo se muestra en la figura 4.7 la comparación entre los datos experimentales y la predicción numérica para el segundo ensayo llevado a cabo con la muestra de con 25% de GR27. El ajuste del modelo es razonablemente bueno: la desviación en términos de error cuadrático medio es de $0,15^\circ\text{C}$ y $0,45^\circ\text{C}$ para las temperaturas correspondientes a los puntos centrales de las superficies enfrentada a la corriente de aire y aislada respectivamente (T_1 y T_3 , fig. 4.3). Se observa cierta desviación con respecto a la experimentación en la predicción del tiempo transcurrido hasta que el cambio de fase concluye en la superficie aislada (en torno a 500s). Este parámetro está ligado, entre otras variables, a la capacidad de almacenamiento latente del material, de modo que podría ser

identificado como un indicio de una posible sobrestimación de esta magnitud. Sin embargo, en este sistema físico la propagación de incertidumbres produce una desviación importante en este punto. Así pues, debido a que la evolución de la temperatura medida está comprendida dentro del rango de incertidumbre asociado a los resultados numéricos, no se puede concluir en base a esta observación que la sobrestimación de la entalpía de cambio de fase, en el caso de que existiera, sea superior al intervalo de incertidumbre calculado para la medida del método T-history ($\pm 4\%$). De cualquier manera, sería interesante como trabajo futuro dentro de esta línea, realizar la medida de la curva entalpía temperatura del material compuesto de mortero y PCM.

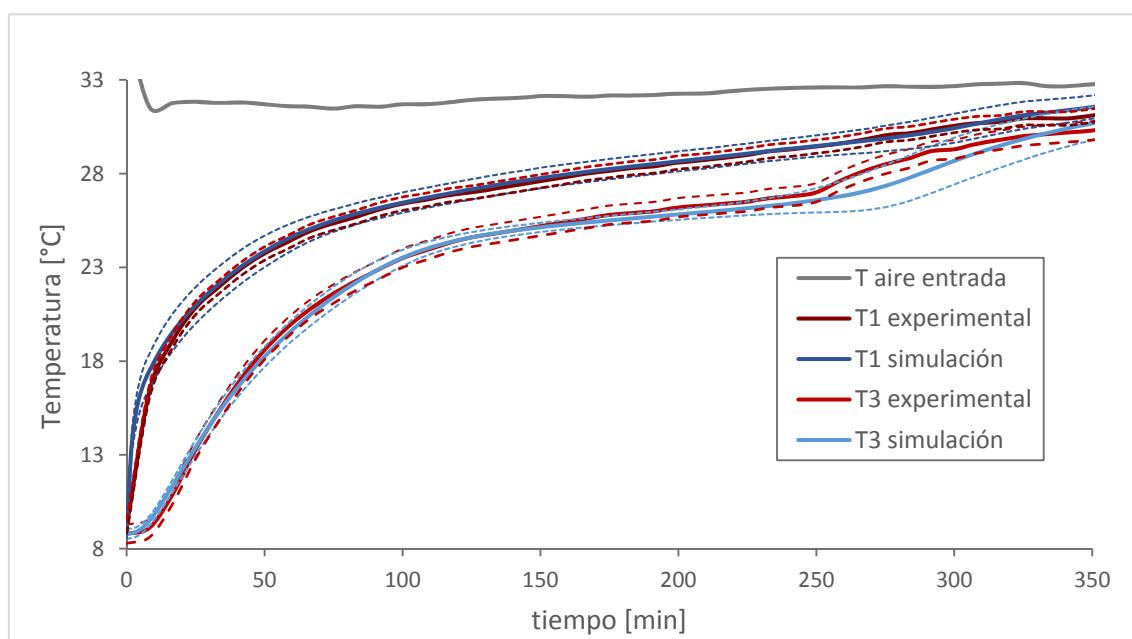


Fig. 4. 7. Comparación de los datos experimentales (25PCM-M2-EII) y numéricos.

Asumiendo, por tanto, que el PCM conserva sus propiedades relacionadas con el almacenamiento tras ser incorporado en el mortero, se muestra en la figura 4.8 una comparativa de la estimación de la capacidad de almacenamiento del material por unidad de volumen en un intervalo de temperatura de 10°C de los materiales analizados junto con los datos (recogidos en la tabla 4.10) correspondientes a trabajos presentados por otros autores sobre la determinación de propiedades de hormigones (Pomianowski et al. 2014) y morteros con PCM (Franquet et al. 2014, Joulin et al. 2014).

Trabajo	Descripción del material	Cantidad PCM	ρ [kg/m^3]	Δh ($20\text{-}30^{\circ}\text{C}$) [$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]	λ [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]
Pomianowski et al. 2014	Hormigón + PCM microencapsulado	6%	1950	14	1,03
Franquet et al. 2014	Mortero + PCM microencapsulado	12,5%	1410	17 ± 3	$0,55\pm 0,02$
Joulin et al. 2014	Mortero + PCM microencapsulado	19%	1250 ± 50	32 ± 3	$0,37\pm 0,01$

Tabla 4. 10. Propiedades de morteros y hormigones con PCM microencapsulado presentados en los trabajos anteriores de Pomianowski et al. (2014), Franquet et al. (2014) y Joulin et al. (2014).

El mortero conformado con un con un 25% del material GR27 supera en densidad de almacenamiento térmico al convencional utilizado como referencia en más del doble (2,2), para un intervalo de temperaturas comprendido entre 20 y 30°C, y en más del tripe (3,5) si el salto térmico considerado es de 22 a 27°C. Por otro lado, los morteros analizados en esta tesis, a pesar de tener un menor contenido en PCM que los analizados por Franquet et al. 2014 y Joulin et al. 2014 –y por tanto una capacidad de almacenamiento por unidad de masa superior- son comparables si se analizan por unidad de volumen ya que poseen una densidad considerablemente mayor (20%).

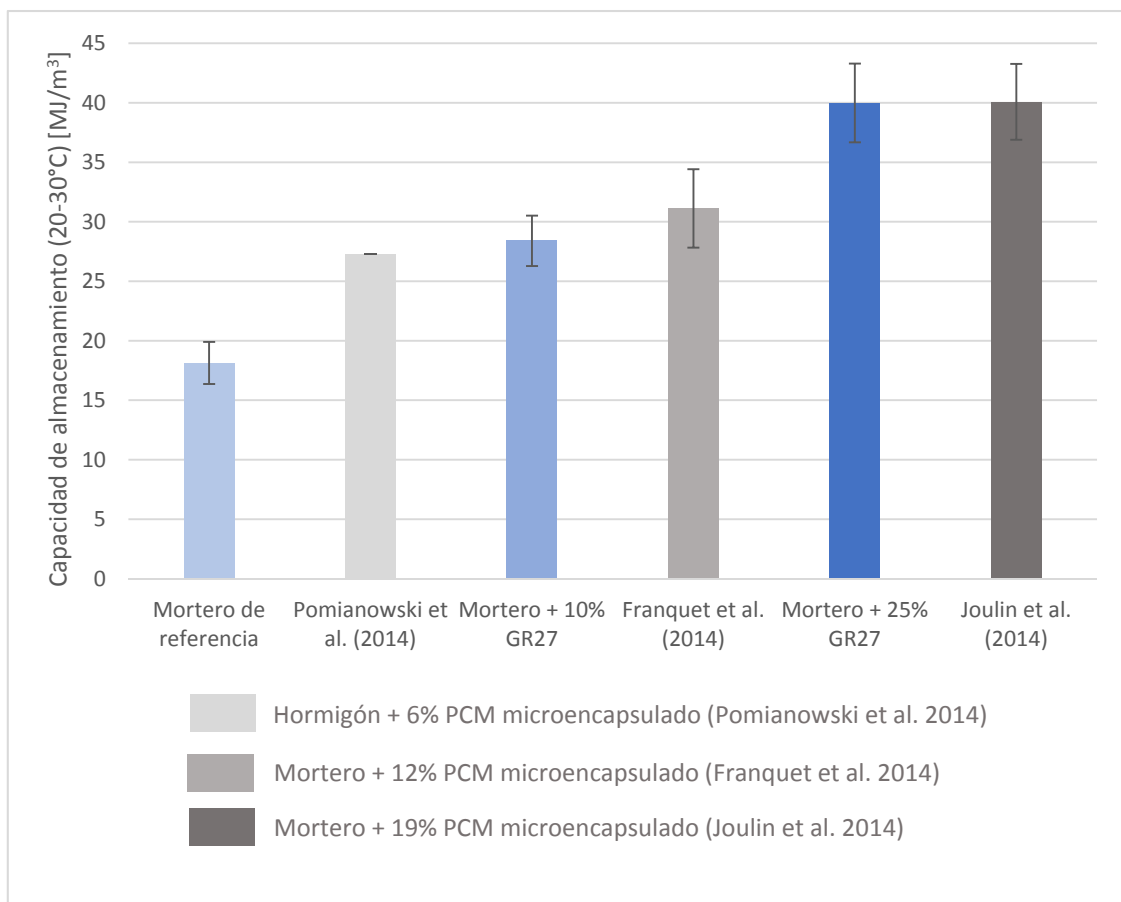


Fig. 4. 8. Comparación de la capacidad de almacenamiento de los materiales analizados con algunos de los trabajos previos de Pomianowski et al. (2014), Franquet et al. (2014) y Joulin et al. (2014).

4.8. Análisis del comportamiento frente al fuego

El objetivo de este análisis experimental es realizar una primera evaluación a escala de laboratorio del comportamiento al fuego de los materiales de construcción compuestos con PCM para su aplicación en un sistema de análisis. Uno de los aspectos importantes de

este estudio es conocer la influencia del contenido en PCM en el compuesto sobre las características analizadas relacionadas con la inflamabilidad, emisión de humos y resistencia al fuego.

La evaluación de estas características, no permite, sin embargo, eludir la necesidad de realizar, con carácter previo a su incorporación a edificios reales, los ensayos pertinentes para la clasificación del material y del sistema de suelo propuesto en base a su reacción (dentro del ámbito europeo regulado por la norma EN 13501-1, 2007) y su resistencia al fuego (EN 13501-2, 2009). En esta tesis, esta evaluación, asociada a una etapa más avanzada en el desarrollo de materiales y sistemas de construcción, se plantea como trabajo futuro.

La realización de este trabajo, centrado sobre uno de los factores críticos de la aplicación de los PCM en la edificación, ha sido posible gracias a la colaboración con el Laboratorio del Fuego de la Escuela Politécnica de la Edificación de Barcelona (Universidad Politécnica de Cataluña) dentro del marco del proyecto del Plan Nacional (ENE2011-28269-C03-01). Las probetas conformadas en la Universidad de Zaragoza fueron enviadas al mencionado laboratorio donde se realizaron los ensayos.

Con el propósito de estudiar el comportamiento al fuego de las muestras de PCM y mortero, se han realizado los siguientes ensayos: de goteo, de medición del humo, de inflamabilidad a partir de un calorímetro de flujo de combustión por pirólisis y de resistencia al fuego a pequeña escala.

4.8.1. Ensayo de goteo (UNE 23725:1990)

Se utilizó un radiador, como el descrito en la norma UNE 23725 (1990), con el objetivo de evaluar el fenómeno de goteo de partículas inflamadas y la aparición de llama en la superficie del material al ser expuesta la probeta al flujo de calor. El equipo se muestra en la figura 4.9. Las muestras de un tamaño de 100x100x10mm se colocan sobre una malla metálica situada 30 mm debajo de la fuente de calor de 500W. De esta forma la superficie de la probeta recibe una radiación de 3W/cm². El radiador se desactiva con cada aparición de llama, volviéndose a accionar una vez que ésta se ha extinguido.

A partir de este ensayo se analizan los siguientes parámetros: el tiempo hasta la primera ignición (TTI, *time to ignition*) y el número de igniciones y la duración media de las llamas observadas durante los primeros 5 minutos en los que tiene lugar la combustión.



Fig. 4. 9. Radiador utilizado en el ensayo de goteo (UNE 23725:1990).

	TTI (s)	Número de igniciones	Duración media de las llamas (s)
0% PCM	-	-	-
10% PCM	38,5	35	5
25% PCM	38	17	13

Tabla 4. 11. Resultados del ensayo de goteo (UNE 23725:1990).

Los resultados del ensayo se muestran en la tabla 4.11. La presencia de PCM en el material provoca la aparición de llama en las dos formulaciones de mortero ensayadas (10 y 25% GR27). El tiempo hasta la primera ignición es similar en ambas muestras. Sin embargo, la persistencia de la llama es menor en la muestra con el 10%. En este ensayo, la observación de tiempos de combustión cortos y un número alto de igniciones es característica de materiales que poseen facilidad para extinguir por sí mismos la llama una vez que cesa el aporte de calor. El mortero con un contenido del 10% de material granulado presentó una persistencia de la llama baja, lo cual está relacionado con su capacidad para la extinción de la llama y para evitar la propagación del fuego.

Por otro lado, el desprendimiento de parte de material durante el ensayo es un fenómeno que afecta negativamente a su comportamiento ante el fuego.

Afortunadamente, en ninguno de los tres compuestos se produjo el goteo de partículas en llamas. Este fenómeno, especialmente crítico en materiales de revestimiento de techos y paredes, afecta negativamente al comportamiento frente al fuego del material.

4.8.2. Ensayo de medición del humo

Este ensayo permite registrar el desarrollo de humo a través de la medida de la transmisión de la luz. Una muestra de 5 g se introduce en la cámara de combustión, donde se provoca la ignición por medio de una resistencia eléctrica de 450W. El dispositivo experimental cuenta con un sistema formado por una lámpara de 25W, un conjunto de lentes y un luxímetro AHKF-0.5/20/60 (suministrado por Regeltechnik) que permite medir la radiación luminosa transmitida. La evolución del porcentaje de radiación transmitida se registra durante el ensayo completo.

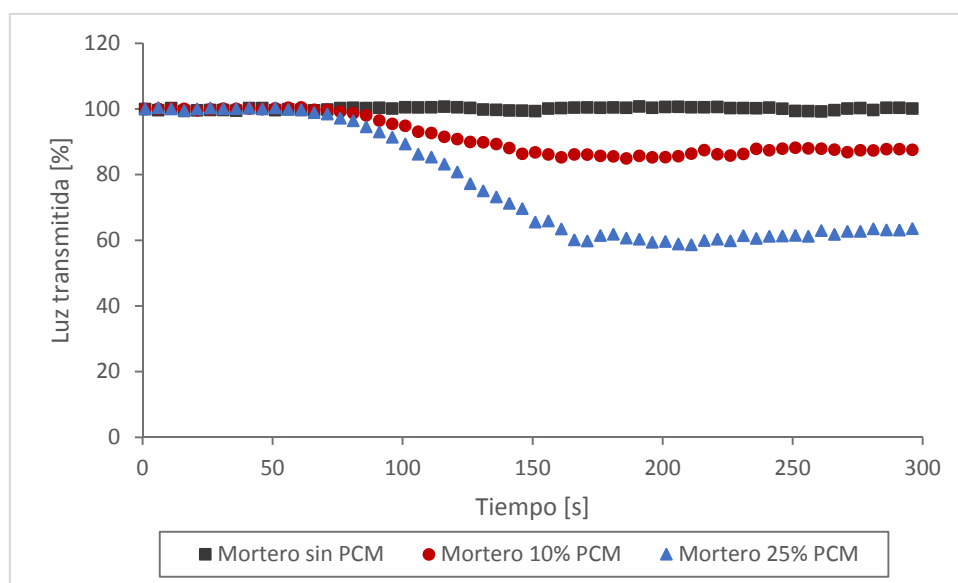


Fig. 4. 10. Evolución temporal del porcentaje de luz transmitida durante el ensayo de medición del humo.

En la figura 4.10 se muestra la evolución de este valor para los tres materiales ensayados. La presencia de PCM en la muestra provoca la emisión de humos cuando ésta es sometida a altas temperaturas. La reducción en la visibilidad provocada por sendas muestras con material orgánico es del 15% y del 40%.

La transmisión de la radiación visible a través de los humos desprendidos es un aspecto importante de la respuesta ante el fuego del material que componen los revestimientos de los espacios interiores de los edificios, ya que está muy ligada con la dificultad en las tareas de evacuación y extinción del incendio. A modo de referencia, muestras de polietileno de baja densidad o poliestireno producen en este ensayo, analizadas bajo las mismas condiciones, una reducción de la visibilidad del 94%.

4.8.3. Calorímetro de flujo de combustión por pirólisis (PCFC¹²)

Se utilizó un calorímetro de flujo de combustión por pirólisis (PCFC, *pyrolysis combustion flow calorimeter*) construido según la norma ASTM D7309, suministrado por el fabricante Fire Testing Technology, para evaluar la inflamabilidad de las muestras de mortero. El equipo está provisto de una cámara pirolítica donde las muestras se calientan en una atmósfera de nitrógeno hasta 750°C a una velocidad de 1°C/s. Los gases emitidos son transportados por el gas inerte hasta la cámara de combustión que opera a 900°C con un flujo de oxígeno (20cm³/min) y nitrógeno (80cm³/min). En el combustor se produce la oxidación de los gases liberados en la cámara pirolítica y la emisión de calor se determina a partir del consumo de oxígeno medido.

En la figura 4.11 se muestra la evolución con la temperatura de la muestra de la tasa de calor liberado (HRR, *Heat Release Rate*) en los ensayos de las distintas muestras. En este caso, dado que la metodología se aplica sobre muestras de pequeño tamaño, se ha ensayado una muestra de material granulado con PCM. Los principales parámetros medidos en los ensayos se presentan en la tabla 4.12: el valor máximo (PHRR, *Peak Heat Release Rate*) [W/g] de la tasa de liberación de calor, la temperatura a la que tiene lugar este máximo (T_{PHRR}) [°C], y la capacidad de liberación de calor (HRC, *Heat Release Capacity*) [J/(g·K)], es decir, el cociente entre el valor máximo del calor liberado y la velocidad de calentamiento del ensayo y la energía térmica total liberada por las muestras (THR, *Total Heat Release*) [kJ/g]. Las magnitudes específicas indicadas se obtienen a partir de la masa inicial de la muestra.

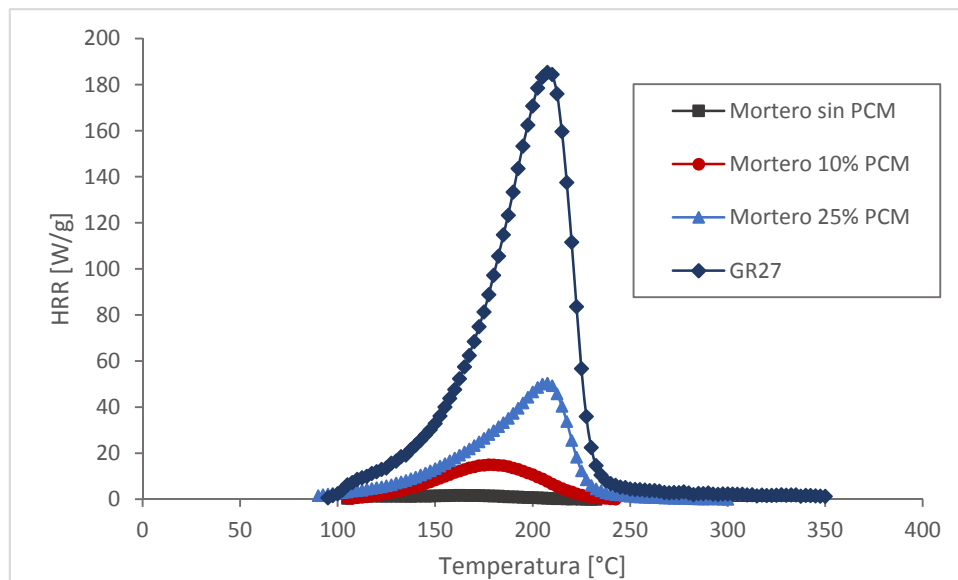


Fig. 4. 11. Calor liberado (HRR) en función de la temperatura en los ensayos PCFC de las distintas muestras.

¹² En adelante PCFC, de inglés *Pyrolysis Combustion Flow Calorimeter*.

	PHRR (W/g)	T _{PHRR} (°C)	HRC (J/g°C)	THR (kJ/g)
GR27	186	208	376	14,43
0% PCM	-	-	-	-
10% PCM	15	178	17	0.77
25% PCM	50	206	94	4.29

Tabla 4. 12. Resultados de los ensayos realizados con el PCFC.

La descomposición del PCM aparece a partir de los 100°C y alcanza su mayor tasa en torno a los 200°C. Este comportamiento observado, concuerda con la información proporcionada por el fabricante (Rubitherm), que sitúa el punto de inflamación en 146°C, y con el análisis termogravimétrico llevado a cabo por Bayes-García et al. (2010). La incorporación del PCM al mortero reduce el PHRR con respecto al material granulado original hasta valores de 50W/g y 15W/g respectivamente en las muestras con un contenido del 25% y 10%. Este indicador está relacionado con la capacidad del material para propagar el fuego, de modo que es deseable la reducción de su valor.

Varios autores han trabajado en la obtención de correlaciones entre los resultados ofrecidos por estos ensayos y otros más utilizados en el ensayo del comportamiento al fuego de materiales de construcción, tales como el método LOI (*Limiting Oxygen Index*), calorímetro de cono y UL94 (Shi et al. 2009, Yang et al. 2010). El HRC obtenido a partir del ensayo ha resultado ser un buen indicador del riesgo de incendio. Pese a no ser posible establecer una correlación directa con resultados obtenidos a partir de otros ensayos normalizados realizados bajo otras condiciones experimentales, Lyon et al. (2007) mostraron como los materiales cuyos valores de HRC son menores a 200J/(g·K) pueden ser clasificados según la normativa UL-94 como V-0 (materiales combustibles autoextinguibles que no presentan desprendimientos de partículas en llamas) con un nivel de confianza del 95%. En este caso, los morteros con PCM, poseen valores de HRC menores a este límite.

4.8.4. Ensayos a pequeña escala de resistencia al fuego

El horno que se muestra en la figura 4.12 se utilizó para controlar la evolución de la temperatura de una muestra de 100x100x10mm colocada sobre la puerta del horno. La temperatura de las dos superficies principales de la muestra se midió con sendos termopares tipo k. El ensayo se realizó con la muestra de referencia –sin PCM– y con la que incluía un 25% de material granulado. En él se evaluó la respuesta de ambos compuestos al ser expuesta una de sus caras a un rápido ascenso de la temperatura hasta aproximadamente 1000°C. Este incremento de temperatura se controla por medio del horno de tal manera que siga la curva normalizada tiempo-temperatura que define la norma UNE-EN 1363-1 (2015). Esta evolución térmica reproduce las condiciones de un incendio totalmente desarrollado en un sector.



Fig. 4.12. Horno utilizado en los ensayos a pequeña escala de resistencia al fuego

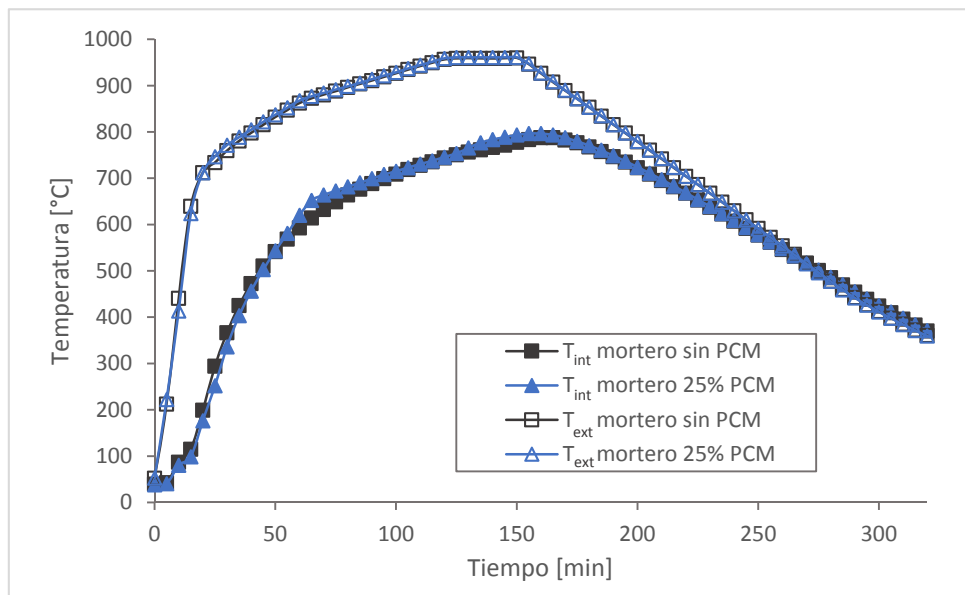


Fig. 4.13. Evolución de la temperatura de ambas caras (int, ext) de las dos probetas ensayadas.

En la figura 4.13 se muestra la evolución de la temperatura de las superficies de las dos muestras ensayadas. Se observa una apariencia similar de las curvas correspondientes a cada superficie. Sin embargo, si se analizan de forma más detallada (figs. 4.14 y 4.15) se pueden advertir ciertos matices. La superficie expuesta al horno de probeta con PCM experimenta un repentino ascenso que se produce en torno a los 400°C. Esta observación puede estar ocasionada por la ignición de los gases desprendidos. Por otro lado, la temperatura de la superficie opuesta de la muestra con PCM es menor –o experimenta un cierto retraso– con respecto a la de referencia hasta los 500°C aproximadamente. Un mayor contenido en agua en la probeta con PCM, que provoque una estabilización más prolongada de la temperatura en torno a 100°C, o el hecho de tener una difusividad térmica menor puede ser la causa de este hecho. Sin embargo la temperatura de la misma superficie de la

probeta con PCM es mayor en el intervalo comprendido entre los 600 y 800°C. La combustión de la parafina puede ser de nuevo responsable de este hecho observado.

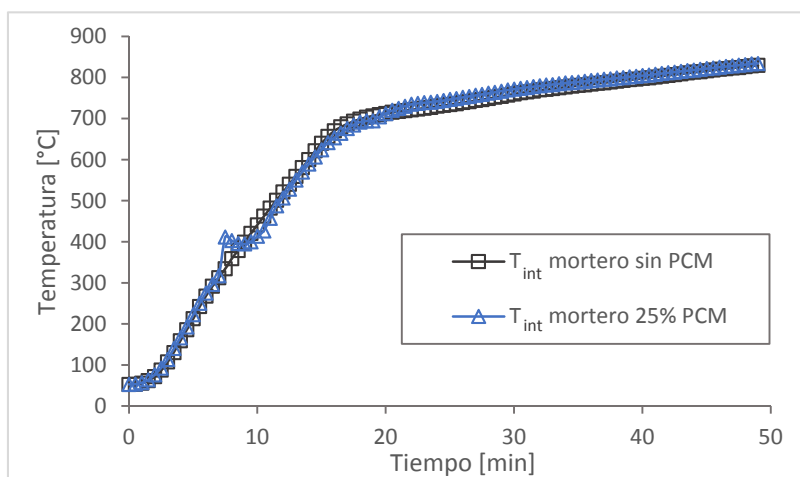


Fig. 4. 14. Evolución de la temperatura de la superficie de las probetas expuesta al horno (int).

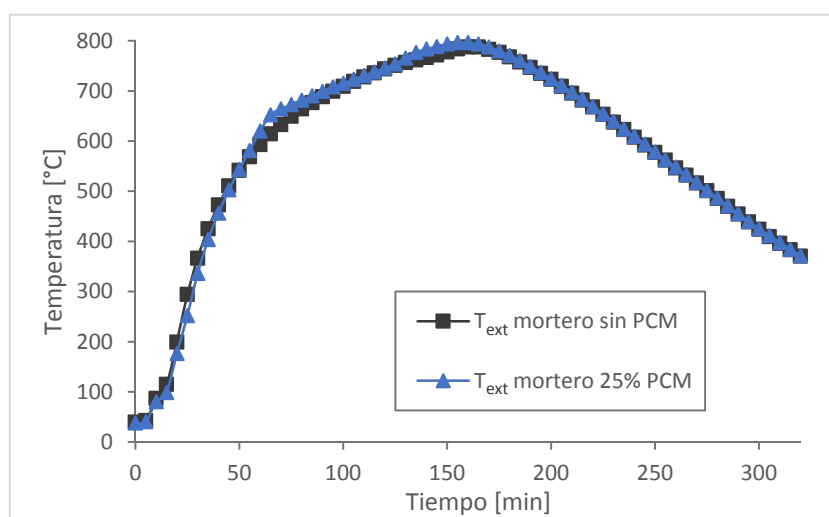


Fig. 4. 15. Evaluación de la temperatura de la temperatura de la superficie protegida (ext).

4.8.5. Discusión

Los ensayos de comportamiento al fuego realizados sobre las muestras de mortero con PCM han mostrado cómo la adición de este material orgánico provoca la aparición de llamas cuando el compuesto se somete a altas temperaturas. No obstante, el material tiene capacidad para extinguir por sí mismo estas reacciones de combustión si el aporte de calor cesa. Esta característica del comportamiento es un indicador de la baja capacidad del material para la propagación del fuego. Asimismo, el mortero con un contenido del 10% en material compuesto granulado con PCM produce una emisión leve de humos durante la combustión. Además, los valores medidos de esta muestra en los ensayos PCFC de la liberación de energía térmica son bajos. En los ensayos a pequeña escala de resistencia al

fuego, la presencia de PCM no modifica de manera significativa la respuesta de ambos materiales. Debido a estas razones, se considera que, pese al deterioro en las características relacionadas con el comportamiento frente al fuego que sufren estos compuestos al incorporar PCM orgánico, estos productos pueden ser integrados dentro de la edificación con las protecciones adecuadas en cada caso.

A partir de estos resultados, se puede señalar el especial interés, como trabajo futuro dentro de esta línea, de realizar algunos de los ensayos establecidos por las normas sobre la clasificación de los materiales y elementos de construcción según su reacción (EN 13501-1, 2007). Como sustrato sobre el que se instala el revestimiento de suelo, sería conveniente analizar la reacción al fuego y emisión de humos (EN ISO 9239-1, 2010) y la inflamabilidad (EN ISO 11925-2, 2011) de sistema completo y su adecuación a los requerimientos exigidos por los códigos nacionales que regulan estos aspectos de la edificación.

4.9. Conclusiones del capítulo

En este capítulo se han analizado las propiedades termofísicas y características de los compuestos de mortero con PCM. Las muestras de mortero se han elaborado a partir de la dosificación que propone la norma DTU65.14 (2006) y utilizan los fabricantes (p. ej. Uponor) para la conformación de los recrecidos para suelo radiante. Los áridos del mortero de referencia han sido sustituidos por las correspondientes cantidades de material granulado con PCM absorbido (GR27) hasta alcanzar una proporción en masa –sobre los componentes secos- del 10 y 25% respectivamente.

El análisis de las propiedades del material se ha centrado en la determinación de las propiedades termofísicas, necesarias para la simulación de los sistemas propuestos, y en el estudio comportamiento frente al fuego del compuesto, ya que éste constituye uno de los aspectos críticos que pueden condicionar la viabilidad constructiva del sistema de suelo radiante propuesto.

Se han medido las propiedades termofísicas utilizando distintos equipos e instalaciones experimentales de laboratorio de la Universidad de Zaragoza. Se ha evaluado el rango de incertidumbre asociado a cada medida. Los métodos utilizados se resumen a continuación:

- densidad: se ha aplicado en el laboratorio el principio de medida de las normas EN 1015-10 (2000) y EN 12390-7 (2009) para la determinación de la densidad aparente de las muestras.
- conductividad y efusividad térmica: mediante el equipo TCi (C-therm), basado en el método modificado de fuente plana transitoria, se han medido sobre la superficie de las muestras ambas magnitudes. El método permite la determinación rápida de estas propiedades de muestras de materiales que no precisan ser conformadas *ad hoc*. Su principal desventaja está relacionada con el carácter local de la medida. Se ha cuantificado la desviación de las medidas de conductividad y efusividad térmica realizadas en distintos puntos de la muestra en un 10 y un 5% respectivamente.

- difusividad térmica: mediante el análisis de los datos empíricos de la transferencia de calor transitoria a través de las muestras, extraídos en el configuración experimental propuesta por Lázaro et al. (2008), se ha obtenido la medida de la difusividad térmica. Esta medida, combinada con la de efusividad térmica, permite obtener una segunda estimación de la conductividad térmica y del calor específico. En el caso de la conductividad térmica, esta evaluación reduce, en comparación con la medida del TCi, la incertidumbre asociada tanto a la heterogeneidad del material como a la correspondiente a la medida de difusividad térmica. Los resultados de la evaluación de las propiedades producidos por ambos métodos –a través de las medidas directas del equipo TCi o mediante la combinación con la medida de la difusividad térmica- son similares.

La adición de PCM provoca una disminución de la densidad y de la conductividad térmica, así como un leve aumento del calor específico del material. Esta reducción de la conductividad térmica sitúa dicho valor por debajo del valor mínimo que exige la norma francesa DTU 65.14 ($1,2\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$). En el capítulo 7, dedicado al estudio numérico del comportamiento del sistema de suelo radiante en una instalación experimental, se analiza este aspecto. Por otro lado, la evaluación teórica de la densidad de almacenamiento de los morteros analizados utilizando la curva entalpía-temperatura del aditivo granulado determinada en el capítulo 3 estima para el compuesto con un 25% supera en el intervalo de temperaturas comprendido entre los 22 y los 27°C en más de tres veces la del mortero utilizado como referencia.

La dependencia con el contenido en PCM de los valores medidos de estas propiedades se ajusta satisfactoriamente a la predicción que ofrecen los modelos sencillos que basan sus cálculos en el estudio del material compuesto como mezcla de dos componentes –mortero y PCM- con propiedades constantes. Concretamente, en el caso de la conductividad térmica, el ajuste de varios modelos destinados al cálculo de esta magnitud en materiales con partículas dispersas produce una estimación de la conductividad térmica del material granulado con PCM próxima a la medida que presenta el fabricante (Rubitherm).

No sólo las propiedades termofísicas medidas y el ajuste de los modelos para la predicción de la dependencia de estos valores con la cantidad de PCM, sino su rango de incertidumbre asociado, constituyen una fuente de información importante para el modelo de simulación desarrollado en esta tesis. Por un lado, estas medidas de laboratorio obtenidas se han utilizado en el capítulo 7 para estudio numérico del comportamiento de una instalación experimental con suelo radiante con PCM. Por el otro, mediante la aplicación del análisis de sensibilidad y de propagación de incertidumbres, a partir de la metodología propuesta en el capítulo 6, se puede evaluar la adecuación de la exactitud de dichas medidas para la realización de dicho estudio numérico (Capítulo 7).

Fruto del trabajo llevado a cabo en el Laboratorio del Fuego de la Escuela Politécnica de la Edificación de Barcelona (Universidad Politécnica de Cataluña), planteado como una colaboración dentro del marco del proyecto del Plan Nacional (ENE2011-28269-C03-01), se ha realizado un primer análisis a escala de laboratorio del comportamiento al fuego de

los materiales. Aunque se ha observado cierto deterioro de estas características causado por la presencia de sustancias orgánicas en el mortero, se considera que estos materiales pueden, con las protecciones apropiadas, ser integrados dentro de los edificios. Dentro de esta línea de trabajo, puede resultar interesante analizar y clasificar el comportamiento al fuego del sistema completo de suelo radiante con revestimiento según los ensayos que marca la norma EN 13501-1 (2007).

Finalmente, otro de los aspectos que sería necesario considerar dentro el trabajo futuro relacionado con la viabilidad constructiva del sistema de suelo radiante propuesto en esta tesis, es el de la evaluación de la resistencia mecánica del material. Sobre esta cuestión, la norma europea específica sobre suelos radiantes -EN 1264-4 (2010)- es explícita sólo en el caso de la resistencia a la compresión del mortero utilizado en suelos radiantes tipo C, que se caracterizan por la conformación del recreado en dos capas de mortero desacopladas mediante una lámina de separación, para la cual exige un valor mínimo de 20N/mm^2 . Sin embargo, en lo que respecta el resto de configuraciones, entre ellas la A –tipo de sistema propuesto en esta tesis-, la norma remite a la normativa concreta de cada país. Dentro del marco normativo español no se han encontrado las exigencias para la resistencia de este elemento de construcción. En el entorno europeo, la norma francesa sobre suelos radiantes DTU 65.14 (2006) amplía para todos los sistemas de suelo radiante el valor mínimo de 20N/mm^2 de resistencia a la compresión del material (clase del mortero C20/25 según la norma EN 206-1, 2008), mientras que la alemana DIN 18560-2 (2009) exige una resistencia a la flexión de 4N/mm^2 para una aplicación de suelo radiante general. Según los resultados de la resistencia mecánica de morteros similares (CEM II 32,5, 10% GR42) obtenidos por Fernández Lladó et al. (2012) según la norma EN 196-1 (2005), 18 y 5N/mm^2 respectivamente en los esfuerzos de compresión y flexión, es previsible que los compuestos analizados en esta tesis no satisfagan estas exigencias vigentes en el ámbito europeo. En el futuro trabajo dentro de esta línea, sería interesante el estudio de composiciones para estos morteros que superen estos valores de resistencia mecánica.

Capítulo 5. Descripción de los modelos numéricos desarrollados

En este capítulo se describen las herramientas de simulación desarrolladas para el estudio teórico del comportamiento del sistema de suelo radiante con PCM. Tal y como se analizó en el capítulo 1, durante la etapa de realización de la tesis, la escasez de modelos que, integrados dentro de programas de simulación de edificios, permitiesen este tipo de estudios numéricos, motivó la necesidad de elaborar una herramienta de cálculo propia. Este desarrollo se ha centrado en dos principales elementos. Por una parte, se ha implementado el modelo que permite la simulación energética de edificios compuestos por una o pocas zonas con una geometría sencilla. Por otra parte, el trabajo se ha centrado en la obtención de un algoritmo numérico para la simulación del sistema de suelo radiante con PCM dentro de esta herramienta de cálculo global. En su desarrollo se ha tenido en cuenta fundamentalmente el compromiso entre la precisión del modelo y coste computacional que exige.

De forma complementaria a la elaboración de estas herramientas de cálculo, se han llevado a cabo una serie de pruebas basadas en técnicas de verificación e intercomparación, con el principal objetivo de proporcionar una mayor fiabilidad a los resultados que se presentan. En el caso de la herramienta que simula el edificio, se ha utilizado la intercomparación mediante el procedimiento BESTEST propuesto por Judkoff y Neymark (1995), mientras que el proceso de comprobación y síntesis del modelo de simulación del suelo radiante, se ha realizado a través de su comparación con una programa que calcula la transferencia de calor de forma más detallada.

5.1. Descripción del modelo de simulación energética de edificios sencillos

El modelo de simulación desarrollado está basado en la aplicación de los balances de energía a los distintos volúmenes de control que se establecen para representar el edificio. Debido a la existencia de múltiples fenómenos de transferencia de calor que intervienen en este sistema físico, esta herramienta de cálculo se ha desarrollado de forma modular. Cada algoritmo representa, por tanto, un modo de transferencia de calor. A lo largo de esta sección se describen los distintos módulos que componen la herramienta de cálculo global. Esta herramienta de cálculo ha sido implementada dentro del programa de resolución de ecuaciones EES (Engineering Equations Solver, Klein 2013).

5.1.1. Condiciones de contorno sobre las superficies exteriores

Las superficies exteriores del edificio intercambian calor con el aire exterior y su entorno mediante convección y radiación, respectivamente. A efectos de cálculo, el modelo divide el espectro de la radiación en dos tramos -radiación de onda larga y corta- que trata de forma independiente. En la siguiente figura 5.1 se representan los distintos modos de

intercambio de calor que se distinguen sobre la superficie exterior de los cerramientos – opacos y transparentes.

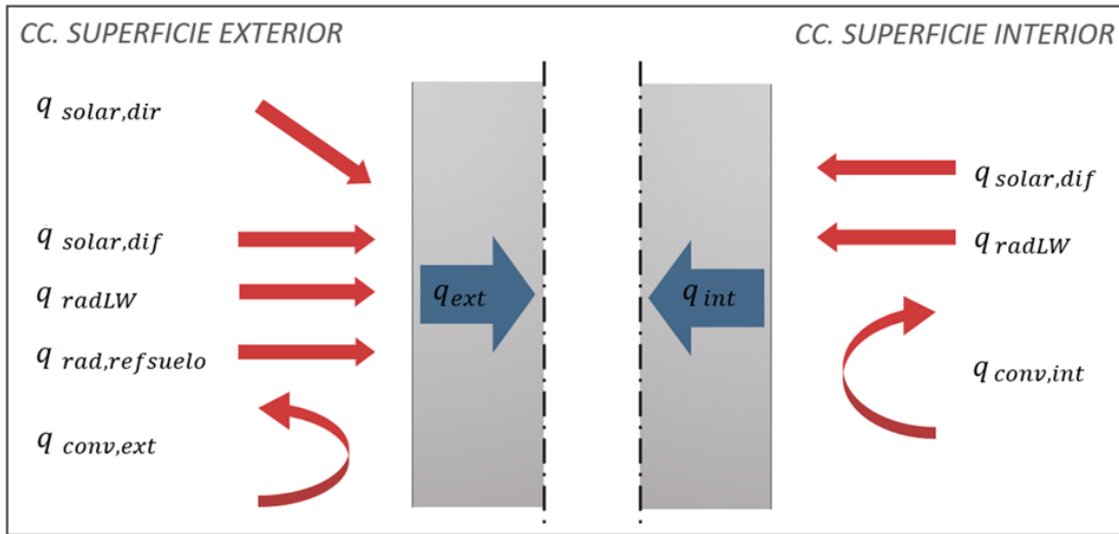


Fig. 5. 1. Modos de transferencia de calor que intervienen en el balance de energía aplicado a las superficies exteriores e interiores de los cerramientos.

5.1.1.1. Radiación de onda corta

La radiación de onda corta se divide, a su vez, en tres componentes: radiación solar directa, radiación solar difusa y radiación solar reflejada en el suelo. Mientras que la radiación solar directa se toma del archivo de datos climáticos, el valor de radiación difusa sobre superficie horizontal se trata a través del modelo de atmósfera anisótropa desarrollado por Pérez et al. (1990). De esta manera, se calcula la radiación difusa incidente según la orientación de la superficie y la posición del sol en cada instante de cálculo. Este modelo tiene en cuenta, además de la radiación difusa isotrópica de la bóveda celeste, la radiación difusa circumsolar y el brillo de la franja de cielo cercana al horizonte. Los autores obtuvieron un error cuadrático medio en el ajuste de los datos empíricos menor a 15W/m². Asimismo, en el trabajo de Loutzenhiser et al. (2007), llevado a cabo en el entorno de la Task 34 de la IEA, en el se realizó un contraste con medidas experimentales de distintos métodos para el cálculo de la irradiación sobre superficies inclinadas integrados dentro de programas de simulación de edificios, el modelo de Pérez et al. (1990) se presenta como uno de los que produce una predicción más fiel de los datos empíricos (NRMSD≈7-8%).

Así pues, en la ecuación 1 se recogen las mencionadas tres contribuciones a la radiación de onda corta incidente sobre las superficies exteriores. Se asume adicionalmente que el suelo refleja de forma difusa la radiación solar.

$$q_{SW,ext,i} = q_{solar\ directa} + q_{difusa} + q_{reflejada\ seulo} = \varepsilon_{SW} \cdot (G_{dir} \cdot \cos(\theta_i) + G_{dif,i} + F_{terreno} \cdot \rho_{terreno} \cdot [G_{dir} \cdot \cos(\theta_{h,solar}) + G_{dif,hor}]) \quad Ec. 1$$

5.1.1.2. Radiación de onda larga

De acuerdo con el modelo propuesto por McClellan y Pedersen (1997), se considera que la superficie exterior intercambia calor por radiación de onda larga con el suelo y la atmósfera. En la ecuación 2 se muestra cada una de estas contribuciones. Para su implementación en el algoritmo numérico, la expresión se linealiza a través de la obtención de los distintos coeficientes equivalentes de transferencia de calor calculados (h_i) a partir de las diferencias de temperatura correspondientes al instante anterior (Ec. 3). La sensibilidad de estos coeficientes frente a la variación de la temperatura superficial es débil, de modo que el error asociado a esta simplificación numérica no es significativo.

$$q_{LW,ext} = \varepsilon_{LW} \cdot \sigma \cdot [F_{suelo} \cdot (T_{suelo}^4 - T_{sup}^4) + F_{atm} \cdot (T_{atm}^4 - T_{sup}^4)] \quad Ec. 2$$

$$h_i^j(T_i^{j-1}, T_{sup}^{j-1}) = \varepsilon_{LW} \cdot \sigma \cdot F_i \cdot \frac{(T_i^{j-1})^4 - (T_{sup}^{j-1})^4}{T_i^{j-1} - T_{sup}^{j-1}} \quad Ec. 3$$

5.1.1.3. Transferencia de calor por convección

El coeficiente de transferencia de calor por convección se calcula, tanto en las superficies exteriores como en las interiores, a partir de dos de los algoritmos implementados en EnergyPlus bajo la denominación, respectivamente, de *detailed* y *DOE-2* (The EnergyPlus Engineering Reference, 2014). La selección de estas correlaciones ha facilitado el proceso de verificación mediante la comparación de los resultados con los de este programa (sección 5.2). En cualquier caso, pese a que el estudio de estos fenómenos no constituye un objetivo principal de la tesis, el modelo permite de una manera sencilla la implementación de algoritmos más detallados para el cálculo de estos coeficientes.

5.1.2. Condiciones de contorno radiativas sobre las superficies interiores

De manera equivalente a la descripción del balance de energía aplicado a las superficies exteriores, se desglosan a continuación los diferentes fenómenos que participan en la condición de contorno sobre las interiores (fig. 5.1).

5.1.2.1. Intercambio de radiación de onda corta entre las superficies interiores

El cálculo del intercambio de calor por radiación de onda corta está basado en las siguientes suposiciones:

- se considera el aire interior como un medio no participativo
- todas las superficies interiores son grises y difusas
- las propiedades radiantes de las superficies no dependen de la temperatura

- la radiación solar directa que incide sobre cada elemento interior ($G_{dir,int,i}$) se refleja uniformemente sobre su superficie

La asunción de esta última simplificación geométrica permite el uso de los factores de vista definidos entre las superficies interiores completas. De esta manera, la radiación que incide sobre cada superficie interior (G_i) se calcula mediante la ecuación 4. En las partes del recinto interior iluminadas por la radiación directa transmitida a través la ventada, se introduce el termino adicional correspondiente ($G_{dir,int,i}$). El procedimiento de cálculo de esta última contribución se describe más adelante.

$$G_i = \sum_j J_j \cdot F_{ji} + G_{dir,int,i} \quad Ec. 4$$

La radiación que abandona (J_i) cada superficie se computa de forma distinta si ésta corresponde a un cerramiento opaco (Ec. 5) o transparente (J_v , Ec. 6). En estos últimos elementos se incluye la contribución de la radiación difusa que incide sobre su superficie exterior y que es transmitida al interior ($T_{d,v} \cdot G_{dif,v,ext}$).

$$J_i = \rho_i \cdot G_i \quad Ec. 5$$

$$J_v = \rho_v \cdot G_v + T_{d,v} \cdot G_{dif,v,ext} \quad Ec. 6$$

A partir del cómputo de este intercambio radiativo se determina el flujo de calor asociado a la radiación de onda corta que recibe cada superficie interior mediante la ecuación 7. En los elementos acristalados, sin embargo, se calcula, para el acoplamiento con el módulo de conducción del calor, la parte de esta radiación que se absorbe en el material transparente. Esta cuestión se explica con mayor detalle en las secciones 5.1.3.2 y 5.1.3.3a.

$$q_{SW,int,i} = (1 - \rho_i) \cdot G_i \quad Ec. 7$$

La radiación directa que incide sobre cada superficie interior ($I_{dir,i}$) se calcula en cada instante teniendo en cuenta la posición del sol y la geometría de la construcción. Para este propósito, se emplea un algoritmo (durante la etapa previa a la simulación) que permite la determinación del área iluminada sobre las superficies interiores. Este procedimiento se puede aplicar a geometrías sencillas: zonas con forma de prisma rectangular y ventanas rectangulares. Se basa en el uso de la geometría analítica para la determinación de las intersecciones entre los rayos solares que definen el contorno de la ventana y cada superficie interior (figura 5.2). Posteriormente, estos puntos se analizan mediante un procedimiento lógico que permite determinar los polígonos sobre los que incide esta radiación. Este tipo de algoritmo se denomina *polygon clipping* según la clasificación de Hiller et al. (2000).

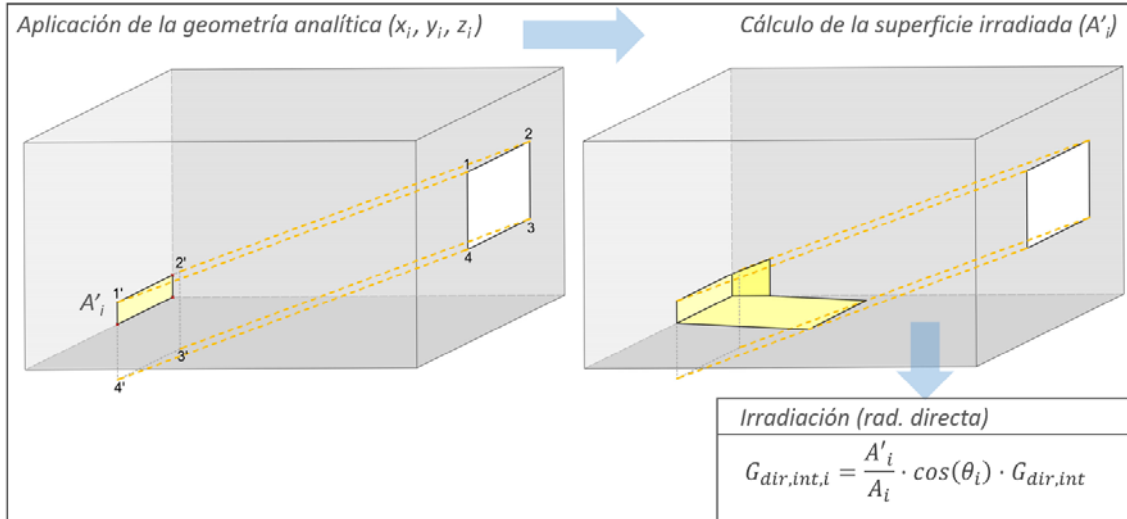


Fig. 5. 2. Representación geométrica del algoritmo de cálculo utilizado para determinación de las superficies interiores sobre las que incide la radiación solar directa transmitida por la ventana.

5.1.2.2. Intercambio de radiación de onda larga entre las superficies interiores

Se utiliza para el cálculo de este fenómeno el método del circuito equivalente (*Network method*) propuesto por Oppenheim (1956) que asume, al igual que en el planteado para la radiación de onda corta, un medio no participativo, superficies grises y difusas cuyas propiedades radiantes, además, no dependen de la temperatura. Asimismo, se considera uniforme la temperatura y el flujo de calor de las superficies interiores y se acepta que los elementos acristalados son opacos para esta radiación. Así, la ecuación 8 representa el intercambio de radiación en la superficie (i) interior.

$$(\sigma \cdot T_i^4 - J_i) \cdot \frac{A_i \cdot \varepsilon_{LW,i}}{1 - \varepsilon_{LW,i}} - \sum_j (J_i - J_j) \cdot A_i \cdot F_{i,j} = 0 \quad \text{Ec. 8}$$

El calor absorbido por cada superficie se calcula mediante la siguiente expresión (Ec. 9).

$$q_{LW,i} = (J_i - \sigma \cdot T_i^4) \cdot \frac{A_i \cdot \varepsilon_{LW,i}}{1 - \varepsilon_{LW,i}} \quad \text{Ec. 9}$$

El sistema no lineal de ecuaciones resultante se puede representar conceptualmente mediante un circuito como el mostrado en la figura 5.3 (izq.). Esta analogía facilita la aplicación de algunas transformaciones frecuentes en la teoría de circuitos. En este caso, se ha hecho uso del principio de superposición y del teorema Thévenin (Thévenin 1883). De este modo, el sistema de ecuaciones se puede linealizar a través de la definición de las admitancias (Y'_{ij} , fig. 5.3) –si éstas se actualizan a las temperaturas del instante anterior– entre cada pareja de superficies interiores (i,j). En la figura 5.3 se muestra gráficamente la transformación a este circuito equivalente que permite este tratamiento numérico. La sensibilidad de estas admitancias a una variación de las temperaturas típicas de las

superficies interiores no es relevante de modo que los errores asociados a esta simplificación son del orden del 0,5%.

Por tanto, el método implementado es lineal, de modo que presenta la ventaja de evitar un proceso numérico de iteración específico asociado al balance de energía en la superficie. Cubillas Fernández et al. (2015) realizaron recientemente un interesante estudio comparativo entre ambos métodos, en el que concluyeron que el algoritmo lineal, que ellos denominaron “explícito”, proporciona una buena aproximación, especialmente para incrementos temporales inferiores a la hora (error máximo en la temperatura de las superficies menor a 0,15°C).

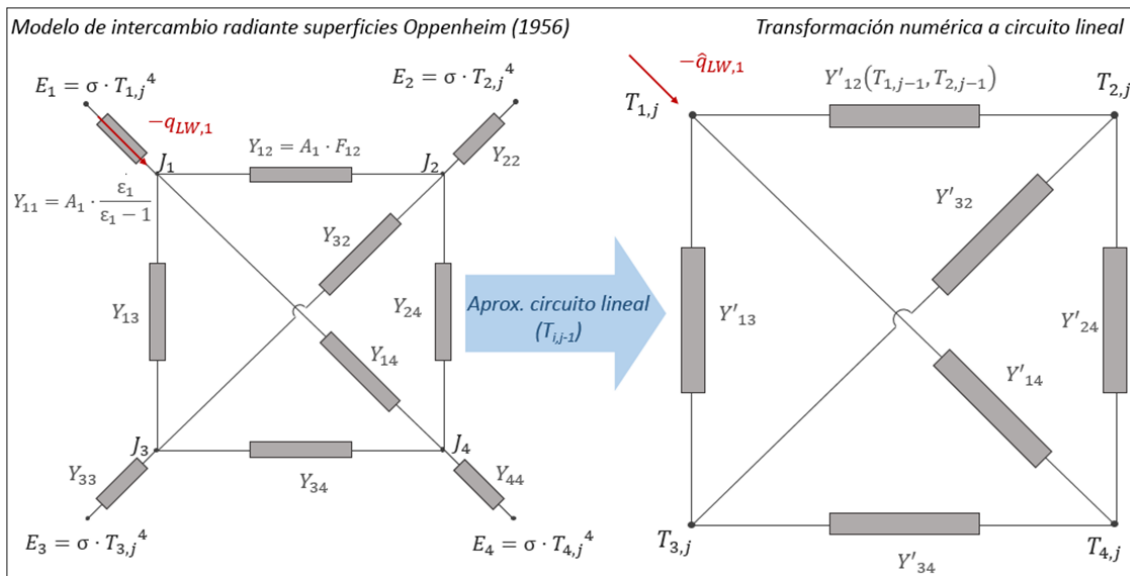


Fig. 5. 3. Circuito equivalente del modelo de Oppenheim aplicado al cálculo del intercambio de radiación de onda larga (izq.). Transformación del circuito equivalente que permite la linealización del sistema de ecuaciones (der.). (Ambas representaciones se han particularizado para el caso de intercambio radiativo entre cuatro superficies)

5.1.3. Cerramientos acristalados

La simulación de los elementos acristalados está basada en el modelo descrito por Arasteh et al. (1989). Se compone de dos módulos de cálculo: por una parte, el correspondiente a la evaluación de las propiedades ópticas del elemento y, por otra parte, el que se ocupa del cálculo de la transferencia de calor a través del mismo. Este último, contempla tanto el fenómeno de la conducción en las láminas de vidrio como el intercambio radiante entre las superficies interiores de la cámara y la convección natural del aire contenido en esta cavidad. Ambos módulos sólo interactúan de manera directa mediante la porción de radiación solar que es absorbida por el vidrio. No se han considerado los efectos de borde del elemento acristalado asociados a la transferencia de calor a través del marco o del perfil intercalario. Ambos módulos sólo interactúan de manera directa mediante la porción de radiación solar que es absorbida por el vidrio. No se han considerado los efectos de borde del elemento acristalado asociados a la transferencia de calor a través del marco o del perfil intercalario.

5.1.3.1. Cálculo de la variación de las propiedades de la lámina de vidrio con el ángulo de incidencia

Las propiedades ópticas de las láminas de vidrio suelen presentarse a partir de su transmitancia y reflectancia frente a radiación que incide de manera perpendicular ($T(0)$ y $R(0)$). En esta sección se describe el método de cálculo implementado para la determinación de la dependencia de estas propiedades con el ángulo de incidencia. Este modelo, descrito por Furler (1991), asume que la lámina de vidrio está compuesta de un material homogéneo y las superficies no tienen ningún tratamiento especial. De manera particular, en su implementación en esta herramienta de cálculo se establecen unas propiedades constantes que se corresponden con la longitud de onda promedio de la radiación solar.

La reflectividad asociada a la frontera entre el aire y la lámina de vidrio se calcula a partir de la ecuación de Fresnel para luz no polarizada (Ec. 10), expresada en función de la relación entre el ángulo de incidencia θ [rad] y el refractado ϕ [rad]. Estos últimos se relacionan mediante la ley de Snell (Ec. 11) a través del índice de refracción.

$$\rho(\theta) = \frac{1}{2} \cdot \left[\left(\frac{\sin(\theta - \phi)}{\sin(\theta + \phi)} \right)^2 + \left(\frac{\tan(\theta - \phi)}{\tan(\theta + \phi)} \right)^2 \right] \quad \text{Ec. 10}$$

$$\sin \theta = n \cdot \sin \phi \quad \text{Ec. 11}$$

A partir de la reflectividad se calcula mediante las ecuaciones 12 y 13 la transmitancia de la lámina, considerando las múltiples reflexiones en las superficies, en función de los ángulo de incidencia (θ [rad]) y refractado (ϕ [rad]), el espesor del vidrio (e_{vid} [m]) y el coeficiente de absorción (α [m^{-1}]).

$$T(\theta) = \frac{[1 - \rho(\theta)]^2 \cdot e^{-\alpha \cdot e_{\text{vid}} / \cos \phi}}{1 - \rho(\theta)^2 \cdot e^{-2\alpha \cdot e_{\text{vid}} / \cos \phi}} \quad \text{Ec. 12}$$

$$T(\theta) = \rho(\theta) \cdot [1 + T(\theta) \cdot e^{-\alpha \cdot e_{\text{vid}} / \cos \phi}] \quad \text{Ec. 13}$$

Para la evaluación de estas características del elemento transparente asociadas a la radiación difusa, se calculan de forma numérica las propiedades hemisféricas (p. ej. Ec. 14, particularizada para la transmitancia):

$$T_h = 2 \cdot \int_0^{\pi/2} T(\theta) \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\theta) \cdot d\theta \quad \text{Ec. 14}$$

5.1.3.2. Cálculo de las características de un acristalamiento doble

Se tiene en cuenta la reflexión múltiple de la radiación solar incidente sobre las láminas de vidrio que componen el doble acristalamiento. Las siguientes ecuaciones (Ec. 15-18) (Arasteh et al. 1989) se utilizan para el cálculo de las características ópticas del conjunto asociadas a cada efecto –transmisión, reflexión y absorción- (se representan gráficamente en la figura 5.4). Estas propiedades del acristalamiento se determinan de manera independiente para la radiación directa, en función del ángulo de influencia, y la radiación difusa, promediadas en el hemisferio (Ec. 14).

$$T_{12} = \frac{T_{11} \cdot T_{22}}{1 - R_{22}^{ext} \cdot R_{11}^{int}} \quad Ec. 15$$

$$R_{12}^{ext} = R_{11}^{ext} + \frac{T_{11}^2 \cdot R_{22}^{ext}}{1 - R_{22}^{ext} \cdot R_{11}^{int}} \quad Ec. 16$$

$$A_1^{ext} = 1 - T_{11} - R_{11}^{ext} + \frac{T_{11} \cdot R_{22}^{ext} \cdot (1 - T_{11} - R_{11}^{int})}{1 - R_{22}^{ext} \cdot R_{11}^{int}} \quad Ec. 17$$

$$A_2^{ext} = \frac{T_{11} \cdot (1 - T_{22} - R_{22}^{ext})}{1 - R_{22}^{ext} \cdot R_{11}^{int}} \quad Ec. 18$$

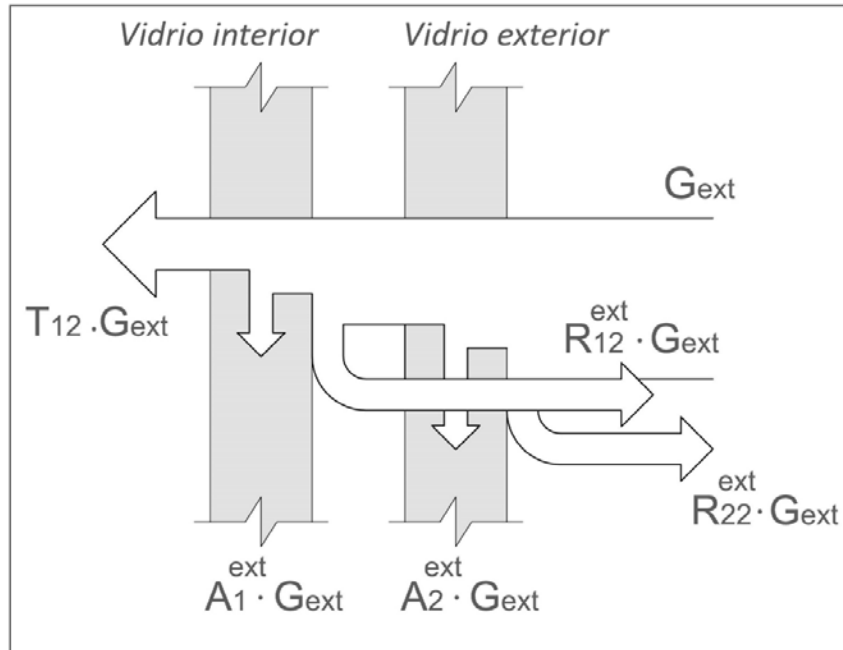


Fig. 5.4. Representación de la reflexión y transmisión de la radiación a través de elementos con doble capa de vidrio.

5.1.3.3. Transferencia de calor a través del elemento acristalado

Además de las características relacionadas con la transmisión, reflexión y absorción de la radiación solar, otro aspecto importante es el que atañe a los mecanismos implicados en transferencia de calor a través del elemento: conducción en las láminas de vidrio, convección en la cámara de aire y el intercambio radiante de onda larga entre las superiores interiores que limitan dicho espacio.

5.1.3.3a. Conducción del calor

Se utiliza un esquema de diferencias finitas con cuatro nodos de temperatura para representar la conducción del calor en cada lámina de vidrio. En la ecuación que modeliza la conducción del calor en dicho material (Ec. 19) se añade el término de generación de calor correspondiente al reparto uniforme en todo el espesor del vidrio de la radiación solar absorbida (Ec. 19). Se asume que las propiedades del vidrio (λ , ρ , c_p) son constantes con la temperatura.

$$\lambda_{vid} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{q_{abs}}{e_{vid}} = \rho_{vid} \cdot c_{p,vid} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad Ec. 19$$

5.1.3.3b. Convección y radiación en la cámara de aire

El modelo implementado desprecia la inercia térmica del aire contenido en la cámara, de modo que el cálculo del flujo del calor transmitido en la cámara de aire se reduce a la evaluación del coeficiente equivalente de transferencia de calor por convección y de la energía transmitida por radiación de onda larga entre las superficies interiores.

El coeficiente de convección en la cámara se calcula por medio de la correlación de Elsherbiny et al. (1982), recomendada por Arasteh et al. (1989), para cavidades rectangulares verticales (Ec. 20). Las propiedades del aire se actualizan para la temperatura asignada al aire (se asume igual al promedio entre las temperaturas de las superficies de las dos láminas de vidrio) correspondiente al instante anterior $(T_{1,j-1} + T_{2,j-1})/2$.

$$Nu = [1 + (0,0303 \cdot Ra^{0,402})^{11}]^{0,091} \quad Ra < 2 \cdot 10^5 \quad Ec. 20$$

Por otro lado, el cálculo del efecto asociado a la radiación de onda larga, al realizarse a partir de las temperaturas del instante anterior, se implementa de manera análoga al de convección. Para ello, se define el siguiente coeficiente equivalente de transferencia de calor (Ec. 21).

$$h_{eq,LW,c} = \frac{\sigma \cdot [(T_i^{j-1})^4 - (T_2^{j-1})^4]}{(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} + 1)(T_i^{j-1} - T_2^{j-1})} \quad Ec. 21$$

5.1.4. Transferencia de calor por conducción a través de los cerramientos opacos

La conducción del calor a través de los cerramientos se calcula mediante un esquema de diferencias finitas unidimensional. Las propiedades termofísicas, excepto las del PCM, se consideran constantes con la temperatura. Se emplea el método implícito para evitar inestabilidades.

5.1.5. Balance de energía al aire interior

La ecuación correspondiente al balance de energía del aire interior se plantea de forma implícita (Ec. 22). Se asume una temperatura uniforme para todo el aire que ocupa el volumen de cada zona de cálculo, de tal manera que se desprecian los efectos de la estratificación. Por otro lado, en este balance de energía se introduce la fracción convectiva ($1-f_{rad}$) de las cargas internas (Q). Su componente radiante, en cambio, se incorpora al modelo de transferencia de calor por radiación de onda larga empleando un reparto ponderado a la superficie de cada pared interior.

$$\begin{aligned} & \rho_{aire} \cdot c_{p,aire} \cdot V_{aire} \cdot \frac{T_{aire,j} - T_{aire,j-1}}{\Delta t} \\ &= \rho_{aire} \cdot c_{p,aire} \cdot V_{aire} \cdot \frac{ACH}{3600} \cdot (T_{aire\ ext,j} - T_{aire,j}) \\ &+ \sum_{sup.int} A_i \cdot h_{conv,i} \cdot (T_{supi,j} - T_{aire,j}) + (1 - f_{rad}) \cdot Q \end{aligned} \quad Ec. 22$$

5.1.6. Resumen de las características del modelo y comparativa con los programas de simulación actualmente disponibles

El objetivo de esta sección es realizar una comparativa, con respecto a los programas de simulación de edificios actualmente disponibles, acerca del nivel de detalle empleado en el estudio de los distintos fenómenos de transferencia de calor. En la tabla 5.2 se resumen estas características del modelo junto con las de tres programas de simulación utilizados frecuentemente en el ámbito de la investigación de los PCM (EnergyPlus, ESP-r y TRNSYS).

En lo que atañe al tratamiento de la radiación solar, se utiliza el modelo de atmosfera anisótropa de Pérez (1990) (Perez et al. 1990), cuyo uso está ampliamente extendido dentro del ámbito de los programas de simulación energética de edificios. Otro ejemplo adicional, que no se recoge en la tabla 5.2, es DOE2 (Loutzenhiser et al. 2007), mientras que programas como BLAST (Judkoff y Neymark, 1995), SUNREL (Deru et al. 2002) o DEST (Zhu et al. 2013) han utilizado algoritmos más simples de radiación isotrópica. El modelo tiene en cuenta además la distribución sobre las superficies interiores de la radiación solar directa en cada instante de cálculo, según la posición del sol y la geometría de la construcción. Pese a que

los programas más avanzados ya incorporan este aspecto -ESP-r, Eplus (The EnergyPlus Engineering Reference), TRNSYS17 (Aschaber et al. 2009)-, no siempre se tiene en cuenta. Este fenómeno se tiende a simplificar, bien a través de la definición de coeficientes de reparto de esta radiación sobre las superficies constantes en el tiempo e introducidos por el usuario -DOE2 (Zhu et al. 2012), DeST (Zhu et al. 2012), TRNSYS16 (Manual del programa, volumen 6) y el método de cálculo definido en la norma EN12565 (2007)- o calculados a partir de consideraciones geométricas simples -EN 13791 (2013)- o bien mediante el análisis de la radiación directa transmitida por la ventana como radiación difusa (TRNSYS16). Se consideran además las múltiples reflexiones de la radiación solar sobre las paredes interiores y la fracción de radiación solar que, tras este proceso, abandona este espacio al ser transmitida al exterior por el acristalamiento; aspectos que no contempla, por ejemplo, la norma EN 15265 (2007).

Los programas de simulación energética de edificios tienen en cuenta la dependencia de las propiedades ópticas de los elementos acristalados con el ángulo de incidencia. Frecuentemente incorporan los resultados obtenidos mediante los programas desarrollados para modelar este tipo de elementos en el Lawrence Berkeley National Laboratory (WINDOW). En el caso de la herramienta de simulación desarrollada, aunque se utilizan hipótesis de cálculo similares, el tipo de elementos acristalados que se pueden incluir está limitado a vidrios homogéneos sin tratamiento superficial. Tampoco se contempla la transferencia de calor a través del marco y del perfil intercalario del vidrio cámara.

En el cálculo de la transferencia de calor por radiación de onda larga en las paredes exteriores se considera, de forma equivalente a otros programas (ESP-r, TRNSYS17, Eplus), el intercambio con la bóveda celeste y la superficie del suelo. Entre las superficies interiores, los programas más avanzados suelen considerar la reflexión múltiple entre las superficies, si bien se emplean distintos métodos para la resolución numérica de estos modelos (resolución numérica del sistema no lineal -Energyplus (The EnergyPlus Engineering Reference, 2014)- o utilización de métodos explícitos -ESP-r y TRNSYS17 (Aschaber et al. 2009)-. En línea con esta tendencia, el algoritmo planteado utiliza un desarrollo a partir del método de redes de Oppenheim (1956) para su resolución como un sistema lineal.

Por tanto, los fenómenos físicos que contempla la herramienta de simulación desarrollada son analizados con un nivel de detalle acorde a los actuales programas de simulación energética de edificios.

5.1.6.1. Limitaciones

El modelo desarrollado ha cumplido con las necesidades que exigía la etapa de investigación sobre elementos termoactivos en la que se ha desarrollado esta tesis. Junto a la herramienta numérica para la simulación del suelo radiante, que se describe más adelante en la sección 5.3, ha permitido el estudio del comportamiento del sistema con PCM que se presenta en el capítulo 7. No obstante, es conveniente presentar aquellos aspectos susceptibles de mejora, hacia los que se podría encaminar el trabajo futuro. En la tabla 5.1 se recogen estas principales cuestiones. Para su elaboración, se ha tenido en cuenta las posibilidades que ofrecen otros programas actualmente disponibles. A pesar de estas

limitaciones, sin embargo, la principal ventaja de esta herramienta es la flexibilidad y comodidad que ha proporcionado en la tarea de estudiar de forma integrada nuevos modelos para la simulación de componentes del edificio activos y pasivos.

Descripción de la geometría	<ul style="list-style-type: none"> -Aumento del número de zonas de cálculo y del nivel de complejidad admisible en la definición de su geometría (actualmente, una o pocas zonas con geometría de prisma rectangular) -Cálculo de las sombras sobre superficies exteriores -Consideración de la obstrucción de la radiación solar directa en el interior
Fenómenos de transferencia de calor	<ul style="list-style-type: none"> -Puentes térmicos -Elementos singulares de conducción 2-3D -Incorporación de la humedad al cálculo de la transferencia de calor -Incorporación de una base de datos de acristalamientos -Consideración de los efectos de borde en las ventanas -Simulación de elementos de sombreado colocados en los elementos acristalados
Otros	<ul style="list-style-type: none"> -Simulación de equipos de calefacción y refrigeración

Tabla 5. 1. Lista de aspectos que, en relación a las posibilidades que ofrecen los programas de simulación energética de edificios, podrían ser incluidos en posteriores desarrollos del modelo.

		TRNSYS 16 <i>type</i> 56	TRNSYS 17 <i>type</i> 56	EnergyPlus	ESP-r	Modelo desarrollado
BE EXTERIOR	Rad. solar exterior: -Radiación difusa	Perez (1990), Hay-Davies, Reindl e isotropa	Perez (1990), Hay-Davies, Reindl e isotropa	Perez (1990)	Perez (1990), Klucher, Muneer e isotropa	Perez (1990), isotropa
	Rad. onda larga exterior	Intercambio T_{sky}	Intercambio T_{sky} , T_{suelo} ,	Intercambio T_{sky} , T_{suelo}	Intercambio T_{sky} , T_{suelo} , puede modificarse por el usuario	Intercambio T_{sky} , T_{suelo}
	Convección exterior (Mirsadegui et al. 2013)	Coeficiente fijado por el usuario o introducción de correlación	Correlaciones:	Correlaciones (p.ej.): TARP(1983), DOE-2 (1994), MoWiTT (1994), etc.	Correlaciones (p.ej.): McAdams (1954), ASHRAE (1975), Liu y Harris (2007)	Correlaciones: TARP(1983), DOE-2 (1994),
BE INTERIOR	Rad. solar interior: -Radiación directa paredes interiores	Tratamiento como rad. difusa o coeficientes de reparto (inputs)	Cálculo rad. incidente (TRNSHD, Hiller et al. 2000)+Factores Gebhart (Gebhart et al. 1961)	Cálculo rad. incidente, cálculo combinado con rad. difusa	Tratamiento como rad. difusa o coeficientes de reparto (inputs) o cálculo rad. Incidente	Cálculo rad. incidente, <i>Network Method</i> (reflejada como difusa) (Oppenheim, 1956)
	-Intercambio de radiación difusa	Reparto ponderado área-absortividad	Factores Gebhart (Gebhart et al. 1961)	Factores de vista	-	<i>Network Method</i> (Oppenheim, 1956)
	Radiación onda larga interior	Método T_{star} (Seem, 1987)	Factores Gebhart (Gebhart et al. 1961)	Factores de Hottel y Sarofim (Hottel y Sarofim, 1967)	Factores de vista explícito (relación de áreas o <i>ray-tracing</i>)	<i>Network Method</i> linealizado (Oppenheim, 1956)
	Convección interior	Coeficiente fijado por el usuario o correlaciones tipo $k \cdot \Delta T^n$, <i>type</i> 80	Coeficiente fijado por el usuario o correlaciones tipo $k \cdot \Delta T^n$, <i>type</i> 80	Correlaciones convección natural ($k \cdot \Delta T^n$) (The EnergyPlys engineering reference, 2014)	Correlaciones convección natural ($k \cdot \Delta T^n$)	Correlaciones convección natural ($k \cdot \Delta T^n$)
Ventana -Transmisión de la radiación solar		Datos importados de WINDOW 4	Datos importados de WINDOW	Modelos WINDOW 4 y 5 (Arasteh 1989, Finlayson 1993) o modelo de vidrio simple (Arasteh 2009)	Datos importados de WINDOW 4.2	Vidrio homogéneo (sin capa) (Furler 1991); doble acristalamiento (Arasteh 1989)

-Transferencia de calor a través del elemento	Conducción, convección (Hollands et al. 1976), radiación LW	Conducción, convección, radiación LW	Conducción estacionaria, convección nat., radiación LW o U_{eq}	Conducción, convección, radiación LW	Conducción, convección nat. (Elsherbiny et al. 1982), radiación LW
-Efectos de borde	Sí	Sí	Sí	Sí	No
Conducción del calor en los cerramientos opacos	Funciones de transferencia	Funciones de transferencia	Funciones de transferencia, diferencias finitas	Volúmenes finitos	Diferencias finitas

Tabla 5. 2. Resumen y comparativa de los modelos de transferencia de calor utilizados en la herramienta de simulación desarrollada con los de algunos programas de simulación.

5.2. Comprobación de la fiabilidad del modelo

El objetivo de esta sección es documentar la metodología seguida en esta tesis para la comprobación de la fiabilidad de los resultados que ofrece el modelo desarrollado para la simulación de edificios con PCM. Este trabajo de análisis de los resultados se ha centrado por un lado en la verificación tanto de la herramienta de cálculo global como de los módulos que lo componen, y por otro, en la intercomparación de los resultados con los de otros programas de simulación aceptados dentro de este ámbito de trabajo.

5.2.1. Justificación

La herramienta de simulación desarrollada, se compone de un número elevado de módulos, o modelos numéricos parciales, que representan los distintos fenómenos de transferencia de calor que intervienen. De esta manera, el modelo global, que reúne y coordina todos estos elementos, necesita una alta cantidad de variables de entrada y presenta una interacción compleja entre los distintos procesos de transferencia de calor. Asimismo, desde el punto de vista práctico, la implementación de este modelo global implica la escritura de un alto número de líneas de código. De forma común a cualquier trabajo de elaboración de herramientas de simulación numérica, se pueden identificar fuentes de error de distinta naturaleza. Por un lado, la utilización de cada uno de estos modelos parciales conlleva ciertos errores relacionados con diversos factores (por ejemplo, con su adecuación al fenómeno físico concreto o con la asunción de ciertas simplificaciones). En otro nivel, se encuentran los errores asociados a la implementación del modelo conceptual, abstraído a partir del conocimiento de los fenómenos físicos implicados (p.ej. relacionados con el algoritmo numérico o con errores de código). En el caso particular de la simulación de edificios, el análisis de estos errores presenta la dificultad asociada a la gran cantidad de fenómenos transferencia de calor que intervienen.

Judkoff et al. (1983) reconocieron estas características particulares de la simulación energética de edificios y juzgaron necesario establecer una metodología sistemática para evaluar la exactitud de estas herramientas de cálculo. De este modo, propusieron tres principales técnicas para realizar esta evaluación: validación empírica, verificación analítica y análisis comparativo de los resultados de distintos modelos. La aplicación de una manera secuencial de cada una de éstas permite no sólo la identificación y el diagnóstico de los errores, sino la eliminación de los efectos de las posibles combinaciones de fenómenos contrapuestos que pueden llevar a conclusiones erróneas acerca del comportamiento del modelo. Estas técnicas para la validación de programas de simulación energética de edificios se han aceptado ampliamente dentro de la comunidad investigadora (Bloomfield 1999) y se han incorporado a metodologías análogas como la definida por Jensen (1995). Otro aspecto interesante, añadido en este último trabajo, es la revisión y análisis crítico de la base teórica aplicada para la síntesis del modelo físico.

El objetivo principal de esta parte del trabajo es proporcionar fiabilidad al modelo numérico desarrollado y, en consecuencia, a los resultados y análisis presentados. Con este

propósito, se ha realizado en primer lugar un análisis comparativo de las principales características del modelo teórico y numérico planteado con respecto a programas frecuentemente utilizados en este ámbito de la investigación (recogido en la sección 5.1.6). Por otro lado se ha trabajado en la verificación del modelo. Conviene aclarar, ya que dentro de cada ámbito de investigación el término puede estar sujeto a matices diferentes, que aquí se entiende por verificación al hecho de asegurar que los resultados y el comportamiento de la herramienta de simulación se corresponden, con un nivel de exactitud aceptable, al modelo físico planteado

En el contexto de esta tesis, se consideran la verificación y la intercomparación con otros programas aceptados dentro de este ámbito de investigación, como las técnicas que pueden contribuir al propósito de este capítulo de una manera más amplia. Desde este punto de vista, la validación con datos empíricos, pese a ser frecuentemente utilizada en la comprobación de modelos físicos, presenta, dentro del ámbito de la simulación de edificios, varios inconvenientes que es preciso señalar. Por un lado, no sólo los resultados empíricos, sino las condiciones en las que se desarrollan los experimentos –relacionadas con los parámetros de entrada del modelo- están sujetos a incertidumbres que pueden ser relevantes. Otro factor importante es el carácter particular de la validación empírica: la fiel reproducción de un cierto ensayo en una tipología concreta de construcción no garantiza su adecuación para la simulación de cualquier edificio. Finalmente, la interacción compleja entre los distintos fenómenos implica que en cada experimento la sensibilidad asociada a cada uno de ellos sobre las observaciones empíricas varía, por lo que es preciso determinar cuáles de estos procesos se pretenden –y es posible- analizar o validar a través de unos ensayos concretos. En los interesantes trabajos de Palomo del Barrio y Guyon (2003) y (2004), donde se propone un procedimiento matemático completo para la validación empírica de estos modelos y diagnosis de los efectos que causan las desviaciones observadas, se destaca este importante aspecto.

A causa de estas dificultades específicas, los trabajos de referencia en la validación experimental de programas de simulación energética de edificios se han realizado en el marco de grandes proyectos de investigación a nivel internacional con un número elevado de entidades investigadoras involucradas. En ellos, se han utilizado los resultados de instalaciones monitorizadas con instrumentación de gran exactitud ensayadas bajo condiciones muy controladas para la validación de algunos aspectos de la transferencia de calor de los edificios: PASSYS (Jensen, 1995), IEA Annex21/Task 12 (Lomas et al. 1997) y Annex 43/Task 34 (Loutzenhiser y Manz 2007, Kalyanova y Heiselberg 2009). Estos ensayos se han centrado sobre el estudio de los procesos de transferencia de calor en cubículos o celdas experimentales (Lomas et al. 1994, Jensen 1995), la validación de los módulos relacionados con la absorción y transmisión de radiación solar (Loutzenhiser y Manz 2007) o el análisis de fachadas de doble piel (Kalyanova y Heiselberg 2009).

Teniendo en cuenta, por tanto, las características particulares de este campo de trabajo, se establecen en esta tesis como principales requerimientos para aportar el mayor nivel de confianza posible al modelo los siguientes:

- en primer lugar, la herramienta ha sido desarrollada bajo unos principios físicos y procedimientos numéricos aceptados dentro del ámbito de la simulación energética de edificios
- en segundo, los cálculos del modelo se corresponden con el modelo teórico planteado (verificación)

5.2.2. Metodología aplicada para la verificación

Tal y como se ha planteado, la comprobación de la fiabilidad de los resultados que ofrece el modelo se ha basado en dos técnicas: verificación e intercomparación, que se han aplicado en dos etapas diferentes. En el diagrama de flujo que muestra la figura 5.5 se esquematiza el procedimiento aplicado. Una parte importante de este proceso ha sido realizada de forma coordinada con la elaboración del modelo global. De este modo, la aplicación de pruebas para la verificación parcial de cada algoritmo -o de la interacción parcial entre algunos de éstos- ha resultado una estrategia eficaz para la detección de errores antes de su incorporación al modelo global, donde la identificación de estos fallos habría resultado considerablemente más costosa.

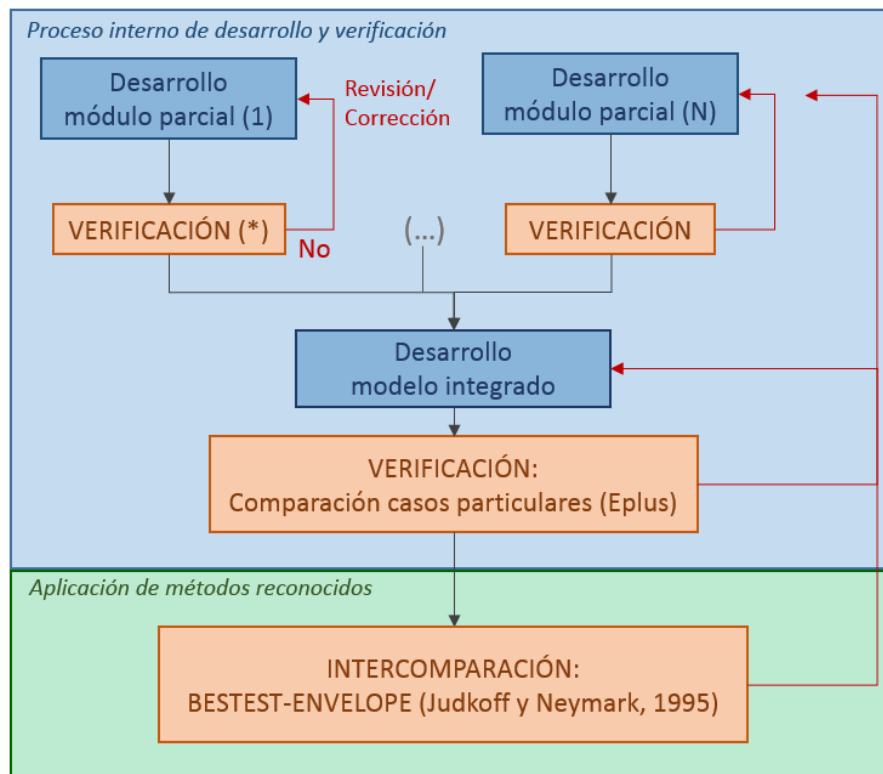


Fig. 5. 5. Diagrama de flujo del procedimiento de análisis de los resultados del modelo. (*) pruebas realizadas para la verificación.

En primer lugar, dentro de las pruebas relacionadas con la verificación del modelo se han utilizado las siguientes técnicas:

- comprobación del cumplimiento de algunas leyes físicas o matemáticas que rigen sobre algunos algoritmos (p.ej. balances de energía)
- análisis de los errores asociados con la discretización numérica
- verificación con soluciones analíticas para casos particulares
- verificación con los resultados de los mismos algoritmos parciales implementados en otros programas contrastados y aceptados dentro de la comunidad científica.

Conviene señalar que no en todas ocasiones es posible aplicar cada una de las técnicas presentadas. No siempre, por ejemplo, existe una solución analítica para cada modelo utilizado. Así pues, las técnicas utilizadas para la verificación parcial de cada módulo han estado condicionadas por este factor y, por supuesto, sujetas al criterio técnico de quien los desarrollaba.

En una segunda etapa, se ha procedido a la intercomparación del modelo completo con los resultados de programas de simulación reconocidos. Se ha considerado importante realizar una comparación basada en una metodología sistemática y aceptada por la comunidad investigadora, como la propuesta dentro del proyecto BESTEST (del inglés *Building Energy Simulation Test*) (Judkoff y Neymark, 1995). Esta metodología, permite contrastar los resultados con los de un conjunto de programas habitualmente utilizados dentro de este ámbito. Por otro lado, proporciona la ventaja adicional de establecer una metodología para el diagnóstico de errores asociados a distintos fenómenos de transferencia de calor, mediante la definición cuidadosa de estos casos para el análisis.

5.2.3. Intercomparación: metodología BESTEST

El proyecto BESTEST se llevó a cabo en el entorno de la IEA, a partir de la constitución en 1990 de comité de expertos en el que convergían entidades investigadoras participantes en los grupos de trabajo de la Task 12 y Annex 21 (Judkoff y Neymark, 1995). Se enmarcó dentro del objetivo global del desarrollo de una metodología sistemática para la validación de programas de simulación de edificios. De forma particular, su propósito era la elaboración de un método sistemático para la prueba e intercomparación de programas de simulación de edificios así como para el diagnóstico de causas de las desviaciones observadas. La metodología se basó en el análisis de los resultados obtenidos sobre una agrupación de casos de estudio de referencia. Bajo la denominación BESTEST se han elaborado desde entonces distintos conjuntos de este tipo destinados al análisis de varios aspectos de la simulación energética de edificios –como, por ejemplo, la centrada en la simulación de la transferencia de calor en el edificio (Judkoff y Neymark 1995), o la dedicada al análisis de las herramientas de cálculo de los equipos de climatización (HVAC BESTEST, Neymark y Judkoff, 2002).

La metodología BESTEST está ampliamente aceptada dentro del ámbito de la simulación energética de edificios. Por ejemplo, la norma ASHRAE 140 (2014), que se ocupa de la descripción de un método normalizado para la evaluar este tipo de programas, utiliza distintos conjuntos de casos de simulación creados al amparo de estos trabajos. Actualmente muchas de estas herramientas de simulación, como EnergyPlus y DOE,

publican los resultados obtenidos mediante la aplicación de dicha norma. Asimismo, dentro del ámbito de la investigación, algunos autores han utilizado esta metodología para probar sus modelos particulares de simulación de edificios (Miranville 2002, Cubillas 2008).

Algunos documentos técnicos y científicos, como la Norma Europea EN 13790 (2011), sobre el cálculo de la energía consumida en calefacción y refrigeración, o la tesis doctoral defendida por Kokogiannakis (2008), son críticos con esta metodología al encontrar que define unos rangos de aceptación para los resultados demasiado amplios para su aplicación en el proceso validación de procedimientos de cálculo del comportamiento térmico de edificios. En este sentido, las normas europeas EN15265 (2007) y EN13791 (2013) establecen sendos conjuntos de casos de estudio para la validación¹³ de los métodos de cálculo de la demanda energética en calefacción y refrigeración o la evolución de la temperatura interior. En éstas, los rangos de la aceptación son más estrictos (por ejemplo, ± 5 , 10 y 15% en el consumo energético, EN15265).

Sin embargo, el número de aspectos de la transferencia de calor en el edificio que es posible analizar a partir de estas normas es muy limitado, ya que exigen la adopción de hipótesis simplificadoras correspondientes a modelos considerablemente menos detallados que los utilizados en esta tesis. Algunos de los ejemplos más significativos de estas simplificaciones son el empleo de coeficientes de reparto constantes para el cómputo de la radiación solar directa que incide sobre las superficies interiores (EN15265, EN13791) o el uso de coeficientes equivalentes de intercambio radiante de onda larga constantes para las superficies interiores (EN15265).

Kokogiannakis (2008) destacó la necesidad de desarrollar una metodología para la intercomparación que defina unos rangos de aceptación más estrictos en la que no fuera necesario introducir un excesivo número de simplificaciones. Las cuestiones relacionadas con los criterios de aceptación establecidos por la norma BESTEST y su aplicación a este caso concreto de este trabajo se discuten en la sección 5.2.4.

Así pues, en el proceso de intercomparación del modelo presentado en esta tesis, se ha seleccionado el conjunto de casos denominado "*Building fabric test cases*" para contrastar la simulación de los principales fenómenos de transferencia de calor que intervienen en los edificios. Este conjunto de simulaciones comprende los siguientes efectos:

- transferencia de calor a través de los cerramientos opacos y transparentes
- convección en la superficies interiores y exteriores
- transferencia de calor por radiación de onda corta y larga en las superficies exteriores
- intercambio de calor por radiación de onda corta y larga entre las superficies interiores
- infiltración, ventilación y cargas térmicas interiores

¹³ Cita textual del título de las normas. Conviene notar que en ellas el término cobra un sentido más amplio en comparación con la terminología utilizada en esta tesis, en la cual se distinguen algunos matices, tal y como propusieron Judkoff et al. (1983), como la validación empírica, verificación e intercomparación.

- cálculo de la demanda de calefacción o refrigeración y de la temperatura interior bajo distintas estrategias de control: temperatura libre y fija, intervalo de temperaturas y control programado en el tiempo.

5.2.3.1. Breve descripción de los casos analizados: building fabric test cases

El conjunto de casos de simulación para la comprobación de los principales fenómenos de transferencia de calor en la estructura del edificio comprende cuarenta problemas base, todos ellos planteados sobre una construcción de geometría simple (ver figura 5.6). Para su definición, se parte del problema más básico (caso 195, Tabla 5.3) en el que predomina el efecto de la conducción del calor a través de los cerramientos. A partir de este caso, se va incrementando el nivel de complejidad, mediante la activación progresiva de distintos fenómenos de transferencia de calor, hasta llegar a las simulaciones más realistas (600-900). Esta sucesiva incorporación de efectos, prácticamente uno cada vez, facilita el diagnóstico de las causas que provocan las posibles desviaciones observadas.

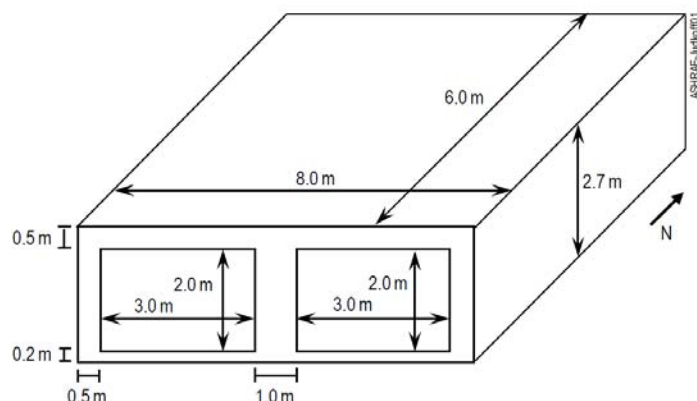


Fig. 5. 6. Imagen de la geometría básica simulada en los casos correspondientes al procedimiento BESTEST building fabric test cases (Judkoff and Neymark, 2013).

De este conjunto completo de casos de simulación, se han seleccionado aquéllos correspondientes a los fenómenos que se pretenden contrastar en el modelo desarrollado. Así pues, los problemas básicos relacionados con efectos que el modelo no contempla han sido excluidos de este análisis. En las siguientes tablas 5.3 y 5.4 se listan y se caracterizan de forma escueta los casos analizados.

	Caso	Aspectos característicos	Mecanismos de transferencia de calor inhibidos	Control
Diagnóstico sobre	195	Conducción en cerramientos	Radiación exterior LW y SW, infiltraciones, ventilación y carga térmica interior (sin ventana)	Temp. fija
	200	Activación secuencial de la radiación LW sobre las superficies interiores y exteriores	Transmisión rad. solar ventana, rad. LW int. y ext., rad. SW, infiltración, ventilación y cargas térmica interior	Temp. fija
	210		Transmisión rad. solar ventana, rad. LW int., rad. SW, infiltración, ventilación y cargas térmica interior	Temp. fija
	215		Transmisión rad. solar ventana, rad. LW ext., rad. SW, infiltración, ventilación y cargas térmica interior	Temp. fija

Diagnóstico sobre casos	220		Transmisión rad. solar ventana, rad. SW, infiltración, ventilación y cargas térmica interior	Temp. fija
	230	Infiltración	Transmisión rad. solar ventana, rad. SW, ventilación y cargas térmica interior	Temp. fija
	240	Carga térmica interior	Transmisión rad. solar ventana, rad. SW, infiltración y ventilación	Temp. fija
	250	Radiación SW exterior	Transmisión rad. solar ventana, infiltración, ventilación y carga térmica interior	Temp. fija
	270	Inclusión de una ventana real: análisis de la radiación SW transmitida al interior	Rad. SW ext., ventilación y carga térmica interior	Temp. fija
	280		Rad. SW int. y ext., ventilación y carga térmica interior	Temp. fija
	320	Control zona neutra	Rad. SW ext., ventilación y carga térmica interior	Zona neutra
	395	Conducción en cerramientos	Radiación exterior SW, infiltraciones, ventilación y carga térmica interior (sin ventana)	Zona neutra
	400	Activación secuencial de la radiación SW sobre las superficies exteriores, infiltración y carga térmica	Transmisión rad. solar ventana, rad. SW, infiltración, ventilación y carga térmica interior	Zona neutra
	410		Transmisión rad. solar ventana, rad. SW, ventilación y carga térmica interior	Zona neutra
	420		Transmisión rad. solar ventana, rad. SW y ventilación	Zona neutra
	430		Transmisión rad. solar ventana y ventilación	Zona neutra
	440	Ventana real	Ventilación	Zona neutra
	800	Cerramientos de gran inercia térmica	Transmisión rad. solar ventana y ventilación	Zona neutra
	810		Ventilación	Zona neutra

Tabla 5. 3. Casos BESTEST para el diagnóstico (Judkoff y Neymark, 1995) utilizados en este trabajo.

	Caso	Aspectos característicos	Mecanismos de transferencia de calor inhibidos	Control
Calificación	600	Edificio de construcción ligera	Ventilación	Zona Neutra
	600FF		Ventilación	Temp. libre
	640		Ventilación	Temp. prog. (*)
	650			Vent. prog. (**)
	900	Cerramientos de gran inercia térmica	Ventilación	Zona neutra
	900FF		Ventilación	Temp. libre
	940		Ventilación	Temp. prog.
	950			Vent. prog.

Tabla 5. 4. Casos BESTEST para la cualificación de los modelos (Judkoff y Neymark, 1995) utilizados en este trabajo. (*) control horario de temperatura programado; (**) control horario de temperatura y ventilación programado.

Los casos de simulación se agrupan en dos tipos: por una parte, los destinados al diagnóstico de errores (195-320 y 395-440) y, por otra parte, los utilizados para la cualificación del modelo (600-650 y 800-950). El primer conjunto, (195-320) define una serie de problemas básicos que permiten aislar los efectos de los distintos fenómenos de transferencia de calor. Debido a que alguno de los programas de simulación que originalmente se analizaron dentro del proyecto BESTEST no permitían la independización de alguno de estos mecanismos, se definieron otros problemas alternativos para el diagnóstico en los que se agrupan algunos de los procesos de transferencia de calor (395-440). Por otro lado, los casos definidos para la cualificación presentan problemas más realistas desde el punto de vista del comportamiento térmico de los edificios. Utilizan tipologías de construcción ligera (600-650) y tradicional (800-950).

El informe final del primer proyecto BESTEST (Judkoff y Neymark, 1995) presenta como referencia los resultados de las simulaciones obtenidos por los modelos de simulación que participaron en el trabajo de comparación original: BLAST, DOE2.1D, ESP, SRES/SUN, SERIRES, S3PAS, TASE, TRNSYS, DOE2.1E. Esta base de datos fue concebida en su momento como una muestra del estado del arte de los modelos de simulación. Pese a no haber sido actualizada desde entonces, estos resultados se incorporaron a la norma ASHRAE 140 (2014) desde su primera versión, en la que continúan vigentes los rangos de aceptación definidos a partir de este primer proyecto. Aunque los propios creadores del método han reclamado recientemente la necesaria actualización de los datos (Judkoff y Neymark, 2013), ésta todavía no se ha hecho efectiva. Dentro de la comparación que ocupa esta tesis, por tanto, se tendrá en cuenta este hecho mediante la inclusión en la comparación de datos de una versión actualizada de EnergyPlus (v8.0, 2013).

5.2.4. Análisis de los resultados

A partir de los resultados obtenidos en cada simulación, se analizan variables como la energía consumida, las cargas máximas de calefacción y refrigeración o la evolución de la temperatura del aire interior. La comparación entre éstas no sólo se realiza en términos absolutos, sino que se estudian de forma diferencial entre distintos casos de estudio. De esta manera, es posible estudiar la sensibilidad de los modelos frente a la variación de uno o varios datos de entrada o cuando se activan determinados fenómenos de transferencia de calor.

En primer lugar, se muestran en la figura 5.7, los resultados –en términos de consumo anual de calefacción y refrigeración- del conjunto de casos simulados en comparación con los recogidos dentro del informe final del proyecto BESTEST (Judkoff y Neymark, 1995). A esta representación se han añadido los cálculos de la versión 8.0 (2013) de EnergyPlus. Los resultados de estos casos se analizan con mayor detalle en los siguientes apartados (5.2.4.1 y 5.2.4.2). Sin embargo, en esta primera presentación gráfica (fig. 5.7), ya se observa una dispersión relevante en los resultados de los modelos analizados dentro del proyecto BESTEST. Los autores identificaron como principales causas de estas desviaciones los diferentes métodos utilizados para tratar la radiación en las superficies interiores y las correlaciones empleadas para el cálculo de los coeficientes de convección (Judkoff y Neymark, 1995). Por este motivo, se ha prestado más atención en este trabajo de comparación a aquellos modelos que guarden mayores similitudes con respecto al planteado en esta tesis (ESP, Eplus). Adicionalmente, con el objetivo de reducir las fuentes de error y simplificar su diagnóstico, se ha implementado para este trabajo las correlaciones que utiliza EnergyPlus v8.0.

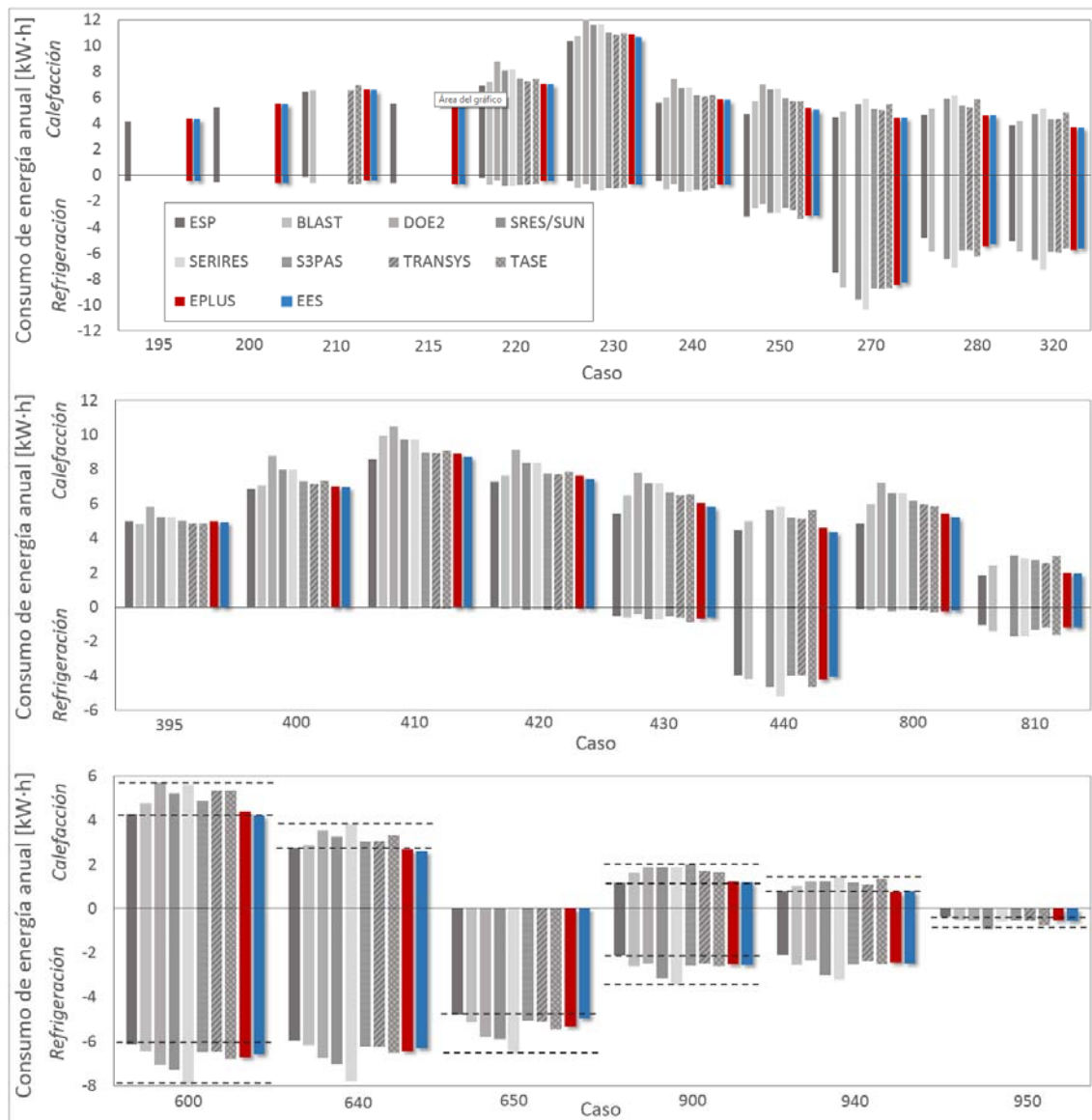


Fig. 5. 7. Presentación, junto con los obtenidos en el proyecto BESTEST (Judkoff y Neymark, 1995) y calculados por Energy Plus v8, de los resultados del consumo energético en calefacción y refrigeración de los casos simulados.

5.2.4.1. Resultados de los casos aplicados al diagnóstico

El método BESTEST propone una metodología sistemática para el diagnóstico de las causas de las desviaciones observadas basada en la comparación secuencial de los resultados numéricos y de su sensibilidad frente a la activación de los distintos fenómenos de transferencia de calor. Al contrario que en las pruebas para la cualificación del modelo, la metodología no establece un intervalo de aceptación para los resultados. Esta decisión, por tanto, depende del criterio de quien realice el análisis.

En este caso, en el que se tratan de diagnosticar los posibles errores en el modelo desarrollado, se han tomado como referencia programas basados en métodos de cálculo similares como ESP y EnergyPlus. En la figura 5.8 se muestra la adaptación que se ha llevado

a cabo de los diagramas de flujo para el diagnóstico de errores propuestos en el método BESTEST.

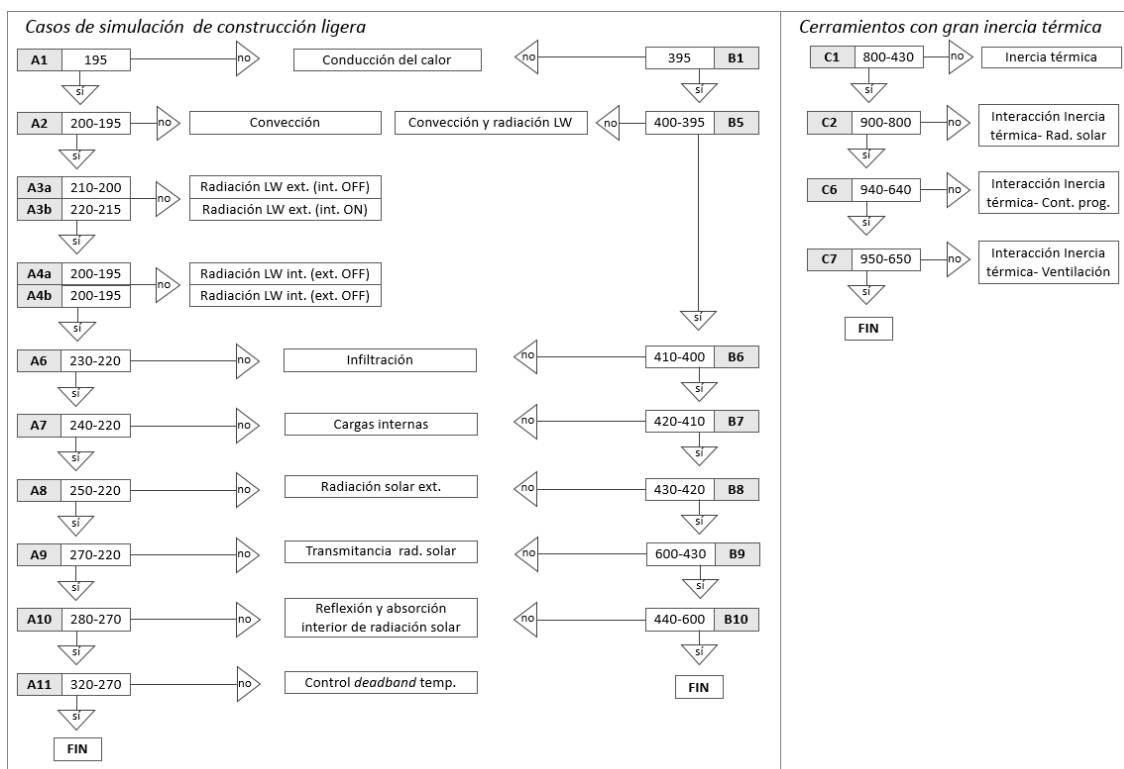


Fig. 5. 8. Diagramas de flujo utilizados para el diagnóstico (izq. casos de construcción ligera; der. casos con cerramientos de gran inercia térmica).

Los resultados de este análisis se muestran de forma gráfica en las siguientes figuras (fig. 5.9 y 5.10). En ellas, se utiliza la codificación abreviada (Ai, Bi, Ci) de las distintas etapas de la secuencia referidas la figura 5.8. Como se observa, en relación a los resultados de EnergyPlus, no existen desviaciones significativas (menores, por ejemplo, al 5% en el consumo de energía anual). Por tanto, no se consideran estas diferencias suficientes para diagnosticar un error en los algoritmos relacionados con los fenómenos de transferencia de calor reflejados en la figura 5.8.

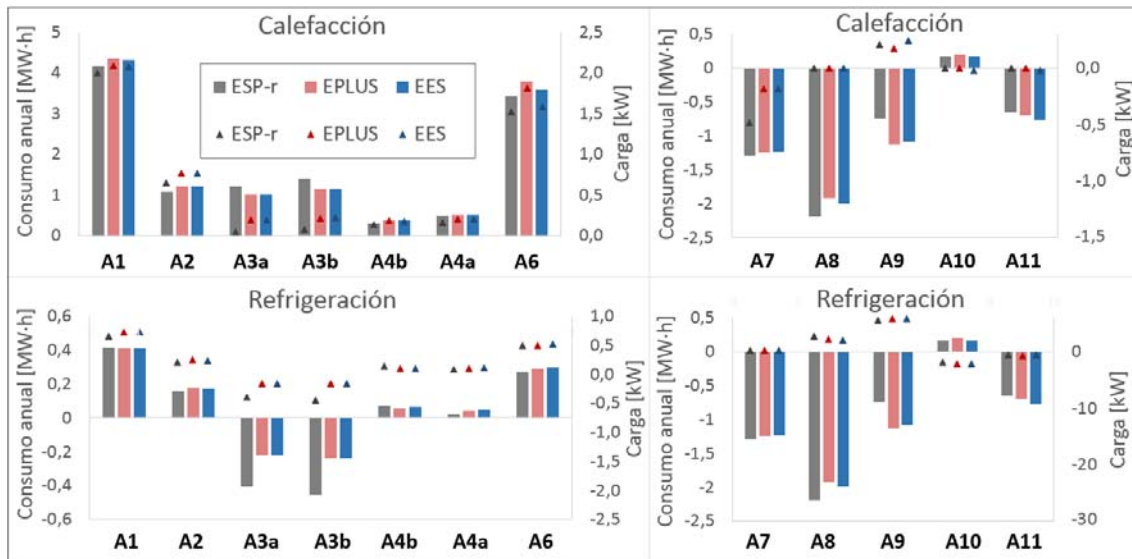


Fig. 5. 9. Presentación de los resultados (consumo energético y cargas máximas) de las pruebas para el diagnóstico detallado (A1-A11).

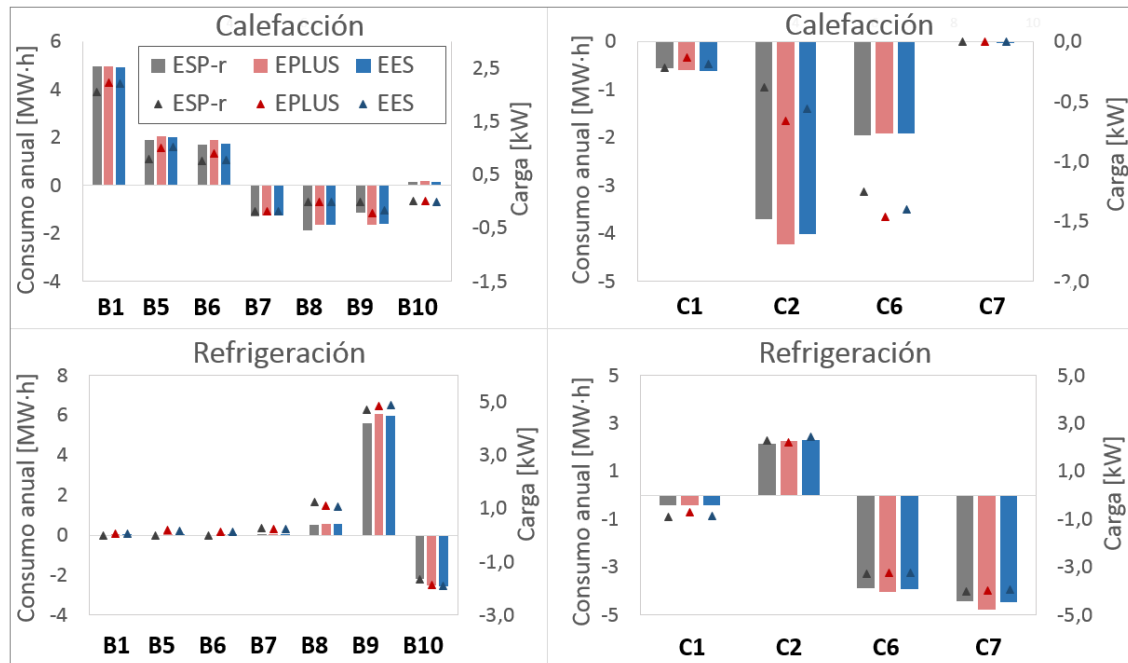


Fig. 5. 10. Presentación de los resultados de las pruebas realizadas para el diagnóstico (izq. construcción ligera; der. cerramientos con mayor inercia térmica).

5.2.4.2. Cualificación del modelo

De una manera análoga al análisis anterior (sección 5.2.4.1), la metodología plantea la aplicación secuencial de pruebas para la cualificación del modelo. En este caso, establece un rango de aceptación para los resultados basado en el análisis comparativo original (Judkoff y Neymark, 1995). Con respecto a este intervalo de aceptación, los propios investigadores que desarrollaron el método fueron prudentes: el hecho de que los resultados se sitúen fuera de este rango, no invalida el modelo. Sin embargo, si la desviación es importante, la experiencia en la aplicación del método ha demostrado que puede ser un

indicador de posibles fallos en la implementación de la herramienta de simulación. En la figura 5.11 se muestra la adaptación de los diagramas de flujo definidos en el método BESTEST al caso particular de esta tesis.

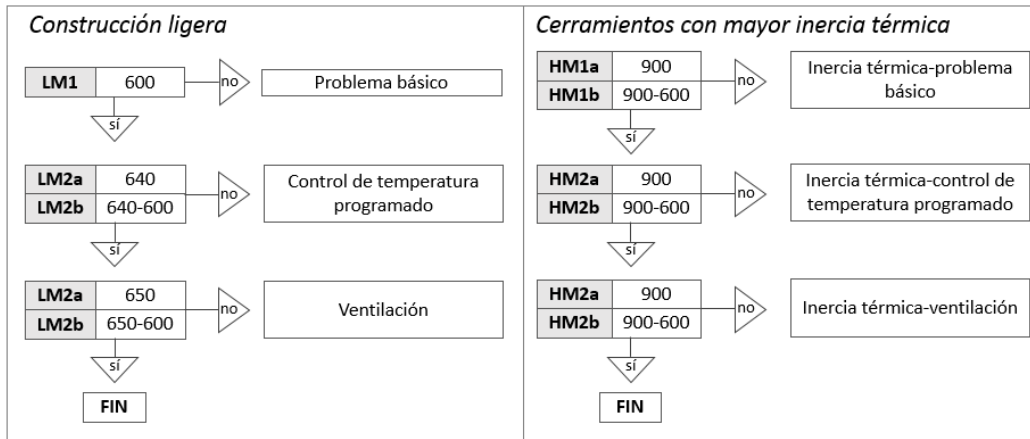


Fig. 5. 11. Diagrama de flujo de las pruebas realizadas para la cualificación del modelo.

En la figura 5.12 se presentan gráficamente los resultados de este análisis. Sobre cada magnitud calculada se refleja además el rango de aceptación. Con respecto a EnergyPlus (v8.0), este análisis muestra unas desviaciones mínimas (siempre menores al 5% en la estimación del consumo energético) tanto en los resultados del modelo, como en su sensibilidad frente a la introducción de los distintos fenómenos considerados. A pesar de ello, si se tienen en cuenta los rangos de aceptación marcados en el método BESTEST, algunas estimaciones del modelo sobre el consumo anual se sitúan ligeramente por debajo del límite inferior. Son obstante, en estos casos las desviaciones son menores al 1% de dicho umbral, de modo que no se consideran suficientes para concluir que existe un fallo en la implementación del modelo.

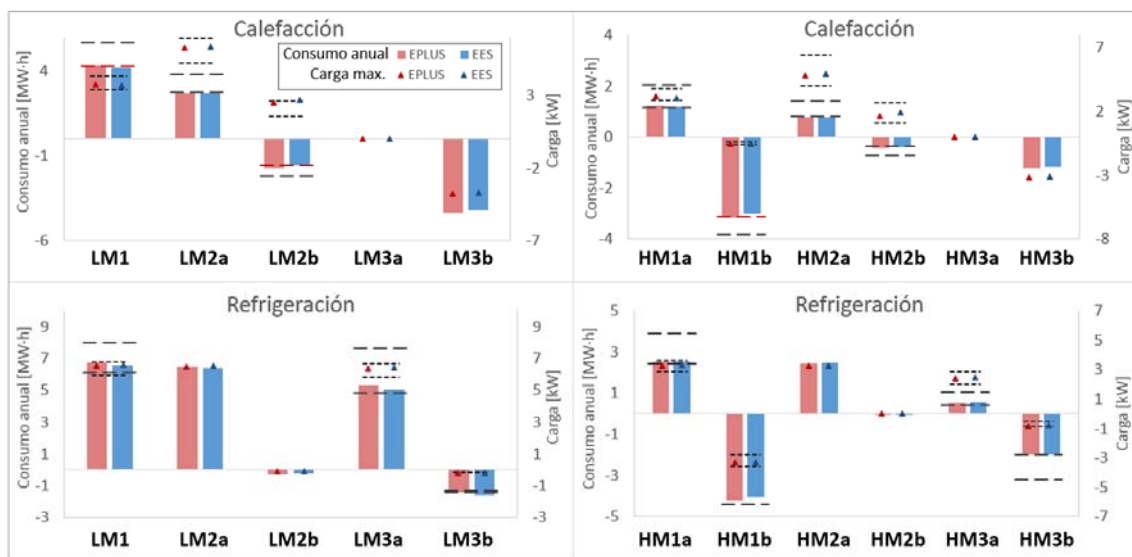


Fig. 5. 12. Representación gráfica del análisis realizado para la cualificación del modelo.

5.3. Modelo de suelo radiante con PCM

En esta sección se describe el trabajo relacionado con la elaboración de la herramienta que permite la simulación -de forma conjunta con el resto de componentes de la construcción- del sistema de suelo radiante con PCM analizado en esta tesis. Debido a que no existe un acuerdo o criterio claro acerca de la precisión necesaria en la descripción de la geometría de estos elementos, se ha propuesto la utilización de tres modelos con distinto nivel de detalle. A través de ellos, se ha estudiado la transferencia de calor bidimensional por conducción en la losa de suelo radiante con PCM como principal fenómeno ligado a la emisión de térmica del elemento. Este efecto, a su vez, condiciona la selección del tipo de herramientas de simulación necesario para su evaluación. Así pues, mediante la intercomparación de los modelos llevada a cabo en el apartado 5.3.2 ha sido posible seleccionar el modelo que finalmente se ha integrado en la herramienta completa para la simulación de edificios.

5.3.1. Descripción de los modelos utilizados

5.3.1.1. Modelo bidimensional integrado en Fluent

En primer lugar, siguiendo un orden decreciente en el grado de precisión utilizado en la descripción de la geometría, se ha implementado en el programa Fluent 6.0 la geometría del sistema de suelo radiante propuesto. El programa utiliza el método de volúmenes finitos en la resolución de las ecuaciones correspondientes a la transferencia de calor por conducción. La evaluación del gradiente en las fronteras de cada volumen finito, se calcula por diferenciación a partir de los valores de la temperatura en los centros de las caras. Por otro lado, la discretización el programa utiliza el esquema implícito para el cálculo discreto de la evolución temporal de la energía térmica del material (Ec. 23)

$$\sum_{S_j} \lambda \cdot \nabla T^k|_{S_j} \cdot S_j = \frac{\rho \cdot V_c \cdot (h(T_i^k) - h(T_i^{k-1}))}{\Delta t} \quad \text{Ec. 23}$$

En la simulación del PCM en Fluent se ha utilizado la opción que ofrece el programa para la introducción de propiedades variables con la temperatura. En este caso, se ha considerado que sólo el calor específico del material compuesto experimenta una variación en torno al cambio de fase. La introducción del calor específico al programa se ha realizado mediante una curva definida por tramos lineales. El resto de propiedades se han fijado constantes, ya que no se han observado variaciones relevantes de la conductividad térmica con la temperatura (vid. Capítulo 4, sección 4.5) y la dilatación térmica del material se prevé despreciable.

La malla se ha generado en el programa Gambit. Los lados de los volúmenes (Δx , Δy) finitos utilizados tienen un tamaño medio de alrededor de 2mm. En la figura 5.13 se muestra la geometría de la malla correspondiente al caso base propuesto para la intercomparación de los modelos. Como se observa, en la selección del dominio del problema se han aplicado

condiciones de simetría. Se asume, de esta forma, que la temperatura del agua que circula por dos tubos contiguos es idéntica.

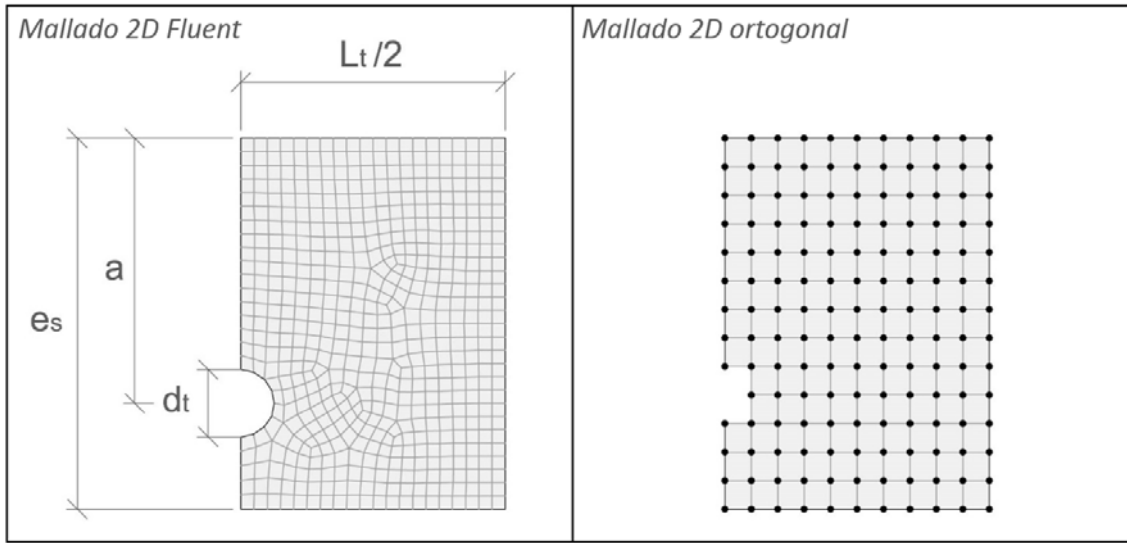


Fig. 5.13. Representación de los modelos bidimensionales utilizados.

5.3.1.2. Modelo bidimensional (malla ortogonal)

En segundo lugar, se ha elaborado un modelo de simulación basado en la resolución del problema de la transferencia de calor mediante un esquema de diferencias finitas planteado sobre una malla ortogonal y uniforme que simplifica –y distorsiona- la geometría de la placa de suelo radiante en torno a los tubos de agua (fig. 5.13). Una simplificación similar ha sido adoptada por Fort (2001) y Shin et al. (2015) en la elaboración de sus modelos de elementos de construcción termoactivos. Esta herramienta de simulación ha sido implementada en el programa EES (Klein 2003).

La ecuación 24 muestra el planteamiento de la ecuación correspondiente al balance de energía aplicado sobre un nodo central de la malla propuesta.

$$\lambda \cdot \left[\frac{T_{i+1,j} - 2 \cdot T_{i,j} + T_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{T_{i,j-1} - 2 \cdot T_{i,j} + T_{i,j+1}}{\Delta y^2} \right] = \rho \cdot \frac{\partial h_{i,j}}{\partial t} \quad \text{Ec. 24}$$

Se han propuesto tres formulaciones alternativas para el cálculo de la variación temporal de la entalpía, que se resumen en la tabla 5.5. Dos de ellas utilizan el método del calor específico equivalente. En estas expresiones, el valor de dicha propiedad se evalúa, respectivamente, a partir la temperatura del nodo correspondiente al instante de cálculo anterior o al actual. Como se analiza más adelante (sección 5.3.2.2a), estas técnicas de discretización pueden introducir errores apreciables en la evaluación de la variación de energía durante el cambio de fase. Éstos tienen lugar cuando el volumen de control se somete a flujos de calor lo suficientemente elevados como para que, a partir del valor del calor específico asociado a cualquiera de las fases (sólida o líquida), se calcule una variación discreta de temperatura que abarque de forma parcial o completa el proceso de cambio de

fase. De esta forma, el esquema numérico realiza una evaluación errónea del cambio en la energía térmica en el material. Pedersen (2007) denominó este fenómeno con la intuitiva expresión de “salto del proceso de cambio de fase”.

Aproximación	Formulación	Características
Calor específico equivalente 1 (valor actualizado a la temperatura del instante anterior)	$\frac{\partial h_{i,j}}{\partial t} = c_p(T_{i,j}^{k-1}) \cdot \frac{T_{i,j}^k - T_{i,j}^{k-1}}{\Delta t}$	Ventajas: -formulación consistente -esquema numérico resoluble mediante un sistema de ecuaciones lineales Desventajas: -evaluación aproximada de la variación de energía asociado al cambio de temperaturas en el nodo -posible “salto” del proceso de cambio de fase
Calor específico equivalente 2 (valor actualizado a la temperatura del instante actual)	$\frac{\partial h_{i,j}}{\partial t} = c_p(T_{i,j}^k) \cdot \frac{T_{i,j}^k - T_{i,j}^{k-1}}{\Delta t}$	Ventajas: -formulación consistente Desventajas: -sistema de ecuaciones no lineal -evaluación aproximada de la variación de energía asociado al cambio de temperaturas en el nodo -posible “salto” del proceso de cambio de fase
Método de la entalpía	$\frac{\partial h_{i,j}}{\partial t} = \frac{h(T_{i,j}^k) - h(T_{i,j}^{k-1})}{\Delta t}$	Ventajas: -formulación consistente -evaluación exacta de la variación de energía asociado al cambio la temperatura del nodo Desventajas: -sistema de ecuaciones no lineal

Tabla 5. 5. Métodos utilizados para la discretización de la variación de entalpía.

Debido a que la descripción de la geometría es aproximada en el entorno del tubo se define el diámetro equivalente, a partir de las características de la malla, mediante la ecuación 25. En ésta, $n_{t,i}$ es el número de nodos que se utilizan para definir cada uno de los contornos laterales que definen el área asociada al conducto. El criterio que rige la mencionada ecuación es el de mantener, en este problema simplificado, una superficie de intercambio de calor entre los tubos y la placa del elemento activo idéntica a la de la configuración real. Fort (2001) y más recientemente Shin et al. (2015) también han aplicado la misma transformación en sus respectivos modelos de suelo radiante.

$$d_t = \frac{2 \cdot (n_{t,x} \cdot \Delta x + n_{t,y} \cdot \Delta y)}{\pi} \quad Ec. 25$$

5.3.1.3. Modelo unidimensional

Finalmente, se utiliza un modelo unidimensional basado en la aproximación descrita por Koschenz y Lehmann (2000) para la simulación de elementos de construcción activa (TABS) convencionales. El método consiste en la agrupación de los efectos bidimensionales

de la transferencia de calor en una resistencia térmica equivalente (R_x). Esta resistencia térmica conecta el nodo ficticio que representa la temperatura de la superficie de la placa en contacto con los tubos con el correspondiente, situado a la profundidad a la que se éstos instalan, al esquema numérico unidimensional que describe el elemento de construcción. En la figura 5.14 se muestra una representación gráfica de esta idea. Esta resistencia térmica se considera constante para una configuración de suelo radiante dada y se calcula de tal manera que el cálculo del flujo de calor en situación estacionaria coincida con el del modelo bidimensional. En la práctica, se puede determinar bien a través de la comparación con los modelos numéricos bidimensionales, o bien mediante la expresión analítica definida por las ecuaciones 27, 28 y 29 que se describen en el apartado 5.3.2.1, dedicado al análisis de la solución estacionaria.

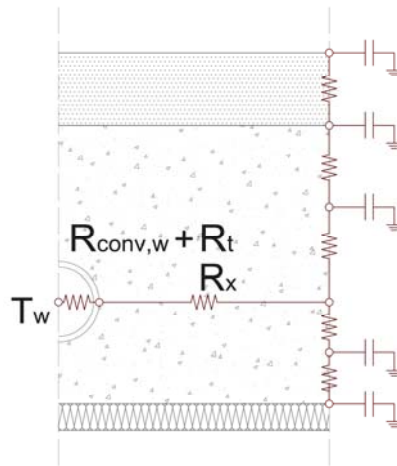


Fig. 5. 14. Representación esquemática de modelo unidimensional de suelo radiante.

5.3.2. Intercomparación de los modelos

El objetivo de esta sección es realizar una comparación entre el cálculo de la transferencia de calor en una placa de suelo radiante con PCM que proporcionan los modelos propuestos. Con esta finalidad, se ha definido el caso base cuyos datos de entrada se recogen en la tabla 5.6 (a partir de los parámetros geométricos definidos en la figura 5.15). En este problema básico, el elemento funciona en modo refrigeración. Es preciso señalar que, si se tienen en cuenta las características de los modelos utilizados (no contemplan subenfriamiento o histéresis), el modo de operación que se analiza (calefacción o refrigeración) no tiene influencia en las conclusiones del estudio. En estas simulaciones se han seleccionado las propiedades termofísicas habituales de los hormigones con PCM microencapsulado, a partir de los datos recopilados en el capítulo 1 (tabla 1.5).

Se ha comparado tanto el cálculo de la situación estacionaria como la evolución temporal del consumo y de la potencia suministrada por el elemento. El estudio del transitorio del sistema se aborda a través del planteamiento de los siguientes procesos:

- puesta en marcha: el sistema se encuentra inicialmente en equilibrio térmico con el ambiente cuando comienza la circulación del agua de refrigeración suministrada a temperatura constante.

- descarga: después de alcanzar la situación estacionaria, cesa el flujo de agua de refrigeración.

En ambos casos se definen condiciones ambientales constantes. Estos procesos básicos fueron también utilizados por Klinker et al. (2014) para el ensayo a escala de laboratorio de la respuesta de dos sistemas de paneles de techo activos.

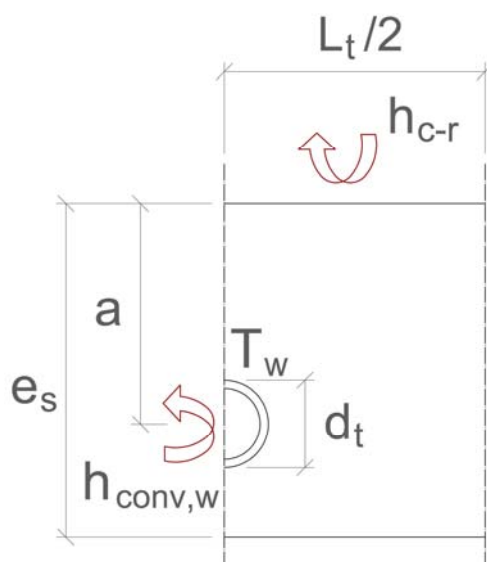


Fig. 5. 15. Definición de los parámetros geométricos de los sistemas de suelo radiante utilizados en los modelos.

Geometría		Propiedades de los materiales		
L_t	94mm		hormigón sin PCM	hormigón+ 5% PCM microenc.
e_s	65mm	ρ	2300kg/m ³	2100kg/m ³
a	47mm	c_p	850J/(kg·K)	920J/(kg·K)
d_t	12mm	λ	0,8W/(m·K)	0,8W/(m·K)
Condiciones de contorno		h_m	-	5,5kJ/kg
T_w	16°C	T_m	-	21°C
$h_{conv,w}$	2000W/(m ² ·K)	ΔT_m	-	4,7°C
T_a	26°C			
h_{c-r}	5W/(m ² ·K)			

Tabla 5. 6. Datos de entrada utilizados en la intercomparación de los modelos.

5.3.2.1. Solución en la situación estacionaria

En la tabla 5.7 se comparan los resultados, en términos de flujo de calor transmitido desde el ambiente al agua que circula a través de la losa, obtenidos por sendos modelos bidimensionales.

A éstos se ha añadido el valor calculado mediante la predicción del modelo analítico propuesto por Koschenz y Lehmann (2000). Este modelo utiliza la solución analítica

estacionaria correspondiente a una losa con tubos embebidos (según se muestra en la figura 5.16) cuya superficie es isoterma (condición de contorno de Dirichlet). No obstante, es preciso señalar que este cálculo analítico no proporciona la solución exacta. En el caso base definido en la tabla 5.6, la condición de contorno convectiva en los tubos, si bien se aproxima, debido al elevado coeficiente de convección considerado ($2000\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$), no es idéntica a la de este modelo. En consecuencia, se ha incorporado a la tabla 5.7 la solución de los métodos numéricos bidimensionales al problema de transferencia de calor que utiliza la condición de contorno de Dirichlet ($T_w=16^\circ\text{C}$) en la superficie de los tubos.

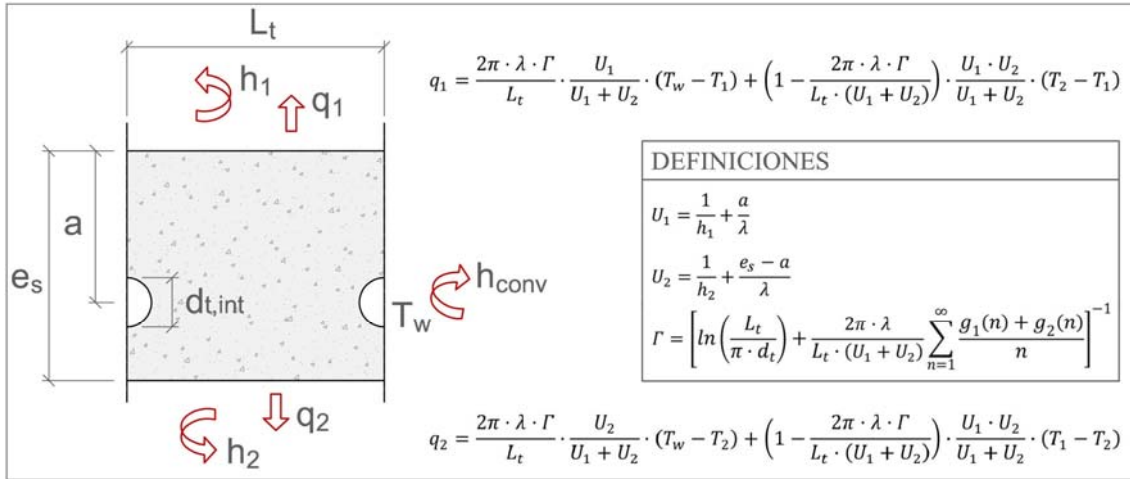


Fig. 5. 16. Representación esquemática del modelo de elemento activo de Koschenz y Lehmann (2000).

A partir de la solución analítica del mencionado problema se puede obtener la resistencia equivalente que representa los efectos bidimensionales de la transferencia de calor (R_x). Ésta se formula de tal manera que los flujos de calor queden definidos según las expresiones que se muestran en la figura 5.16. En este caso concreto, en el que se ha definido el contorno inferior aislado térmicamente, el flujo de calor entre el aire interior y el agua que circula por los tubos se puede calcular mediante la ecuación 26.

$$q_{a-w} = \frac{(T_a - T_w)}{R_{conv,w} + R_x + a/\lambda + R_{c-r}} \quad \text{Ec. 26}$$

Donde la resistencia R_x [$\text{K}\cdot\text{m}^2/\text{W}$] se calcula por medio de la siguiente expresión (Ec. 27):

$$R_x = \frac{L_t}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \left[\ln\left(\frac{L_t}{\pi \cdot d_t}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{g_1(n) + g_2(n)}{n} \right] \quad \text{Ec. 27}$$

Los términos $g_1(n)$ y $g_2(n)$ de la serie se obtienen a partir de las ecuaciones 28 y 29.

$$g_1(n) = \frac{\frac{h_1 \cdot L_t + 2 \cdot \pi \cdot n}{\lambda} e^{-\frac{4 \cdot \pi \cdot n}{L_t} (e_s - a)} - e^{-\frac{4 \cdot \pi \cdot n}{L_t} e_s}}{\frac{h_1 \cdot L_t - 2 \cdot \pi \cdot n}{\lambda} e^{-\frac{4 \cdot \pi \cdot n}{L_t} e_s} - \frac{\left(\frac{h_1 \cdot L_t + 2 \cdot \pi \cdot n}{\lambda}\right) \left(\frac{h_2 \cdot L_t + 2 \cdot \pi \cdot n}{\lambda}\right)}{\left(\frac{h_1 \cdot L_t - 2 \cdot \pi \cdot n}{\lambda}\right) \left(\frac{h_2 \cdot L_t - 2 \cdot \pi \cdot n}{\lambda}\right)}} \quad Ec. 28$$

$$g_2(n) = \frac{\frac{h_2 \cdot L_t + 2 \cdot \pi \cdot n}{\lambda} e^{-\frac{4 \cdot \pi \cdot n}{L_t} a} - e^{-\frac{4 \cdot \pi \cdot n}{L_t} e_s}}{\frac{h_2 \cdot L_t - 2 \cdot \pi \cdot n}{\lambda} e^{-\frac{4 \cdot \pi \cdot n}{L_t} e_s} - \frac{\left(\frac{h_1 \cdot L_t + 2 \cdot \pi \cdot n}{\lambda}\right) \left(\frac{h_2 \cdot L_t + 2 \cdot \pi \cdot n}{\lambda}\right)}{\left(\frac{h_1 \cdot L_t - 2 \cdot \pi \cdot n}{\lambda}\right) \left(\frac{h_2 \cdot L_t - 2 \cdot \pi \cdot n}{\lambda}\right)}} \quad Ec. 29$$

Modelo / Método de cálculo	Condiciones de contorno			
	h _{conv} =2000W/(m ² ·K)		T _{sup,tubos} =16°C	
	q _{suelo} [W/m ²]	Error [%]	q _{suelo} [W/m ²]	Error [%]
Volúmenes finitos	35,91	-	36,08	0,1%
Malla ortogonal 4,7mm	36,00	0,2%	36,17	0,4%
Malla ortogonal 2,35mm	35,85	-0,2%	36,04	0,0%
Modelo analítico	35,87	-0,1%	36,04	-

Tabla 5. 7. Comparación del flujo de calor sobre la superficie del suelo calculado en situaciones estacionarias (cc. Fourier y Dirichlet).

Como se observa, los modelos elaborados sobre una malla ortogonal proporcionan, para esta geometría, una aproximación razonablemente exacta a la solución analítica del problema. Asimismo, en ambos casos (c.c. Fourier y Dirichlet) las diferencias entre las estimaciones de los esquemas numéricos bidimensionales son menores al 0,2%.

Por otro lado, se presenta en la figura 5.17 la comparación entre la temperatura promedio en la dirección horizontal, calculada según la ecuación 30, que se obtiene a partir del modelo bidimensional (malla ortogonal) y la correspondiente al método unidimensional. El error cuadrático promedio entre ambas distribuciones de temperaturas es menor a 0,03°C.

$$\bar{T}(y) = \frac{\int_{x=0}^{x=L(y)} T(x,y) \cdot dx}{L(y)} \quad Ec. 30$$

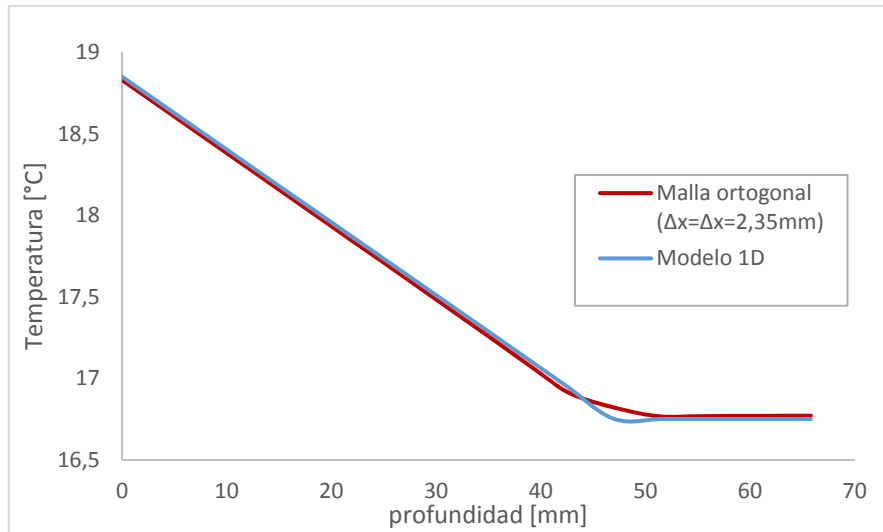


Fig. 5. 17. Gradiente vertical de la temperatura promedio calculada sobre la dirección horizontal obtenida por el modelo 2D (malla ortogonal) y el unidimensional (R_x).

5.3.2.2. Análisis de la evolución transitoria

5.3.2.2a. Influencia del método de discretización de la variación temporal de entalpía

En primer lugar, es interesante analizar la influencia del método utilizado para la discretización de la evolución temporal de la energía térmica asociada al volumen finito (tabla 5.5). Para este propósito, resulta significativa la comparación de la variación de energía térmica en la losa del suelo, durante el proceso completo de puesta en marcha, calculada según el balance de energía establecido a partir de los flujos de calor en las fronteras del dominio del problema (\bar{q}_t , en la superficie de los tubos; $\bar{q}_{sup,s}$ sobre la superficie del suelo; Ec. 31). Este análisis se ha aplicado a la solución de la herramienta de simulación bidimensional que usa una malla ortogonal ($\Delta x = \Delta y = 2,35 \text{ mm}$). En la tabla 5.8 se muestra la influencia del método utilizado, así como de la resolución en la discretización temporal, en el cálculo de dicho balance de energía.

$$\Delta H_{BE} = \frac{\int_{t=0}^{t=\infty} (\pi \cdot d_t \cdot \bar{q}_t - L_t \cdot \bar{q}_{sup,s}) \cdot dt}{L_t} \quad Ec. 31$$

Se observa cómo el algoritmo que evalúa la variación de energía a partir del calor específico correspondiente a la temperatura del instante anterior produce importantes desviaciones en el cálculo del balance de energía durante el proceso completo de puesta en marcha. Esta subestimación de la variación de energía asociada al algoritmo numérico, tiene lugar cuando se produce el fenómeno que Pedersen (2007) denomina “salto del proceso de cambio de fase” (introducido previamente en la sección 5.3.1.2). Su efecto se acentúa en presencia de gradientes de temperatura elevados o fuertes coeficientes de convección. Así pues, desde este punto de vista, entre los dos casos básicos propuestos para el estudio de la

respuesta transitoria del elemento, el proceso de puesta en marcha resulta el más desfavorable.

A partir de este análisis, se concluye que, pese a que el método de la entalpía resulta más costoso desde el punto de vista computacional, debe ser seleccionado con el fin de evitar las mencionadas desviaciones. Dicho método se ha implementado finalmente en las herramientas de simulación desarrolladas (2D-malla ortogonal, 1D).

Aproximación	Δt [s]	ΔH_{BE} [kJ/m ²]	$(\Delta H_{BE} - \Delta H) / \Delta H$ [%]
Calor específico equivalente 1	100	-1716	-2%
	200	-1711	-2%
	1000	-1639	-6%
	2000	-1564	-11%
Calor específico equivalente 2	200	-1770	1%
	2000	-1698	-3%
Método de la entalpía	50	-1751	0%
	200	-1757	0%
	2000	-1760	1%
	4000	-1760	1%

Tabla 5. 8. Influencia del método de discretización temporal en el cálculo del balance de energía, aplicado sobre el dominio del problema durante el proceso completo de puesta en marcha.

5.3.2.2b. Procesos de puesta en marcha y descarga

En este apartado se analiza la respuesta dinámica, en términos de potencia de refrigeración consumida y suministrada, que predicen los tres modelos durante los procesos de puesta en marcha y descarga. En las figuras 5.18, 5.19 y 5.20 se comparan los cálculos obtenidos por los tres métodos en diferentes situaciones, mientras que la tabla 5.9 resume las desviaciones observadas entre los modelos. En esta tabla, la desviación relativa se ha calculado dividiendo el error cuadrático medio entre la correspondiente potencia media durante el proceso concreto.

En primer lugar, se observa que los resultados de ambos modelos bidimensionales son prácticamente idénticos, los errores en todos los procesos son menores al 1%. Se puede concluir por tanto que, en este caso, no es necesaria la descripción detallada de la geometría del elemento en el entorno de los tubos para obtener una buena aproximación a los resultados, tanto en la situación estacionaria como en la transitoria, del problema de transferencia de calor planteado.

Por otro lado, se observa un ajuste razonable del modelo unidimensional a los resultados. Las diferencias se acentúan durante el proceso de puesta en marcha, especialmente en el cálculo de la potencia de refrigeración suministrada (que ascienden hasta un 9% en promedio en el caso con PCM). Durante el proceso de descarga, en el que se

mitigan los efectos bidimensionales, la diferencia entre los modelos es más reducida (2%). Se considera, a partir de estos resultados, que el modelo unidimensional proporciona una aproximación a los resultados de los modelos bidimensionales en los procesos transitorios aceptable para su integración dentro de la herramienta de simulación de pequeños edificios desarrollada.

No obstante, dado que esta comprobación se ha realizado sobre un caso particular, se realiza en los siguientes apartados (5.5.3.4 y 5.5.3.5) una comparación más exhaustiva aplicada a los sistemas y materiales analizados en esta tesis.

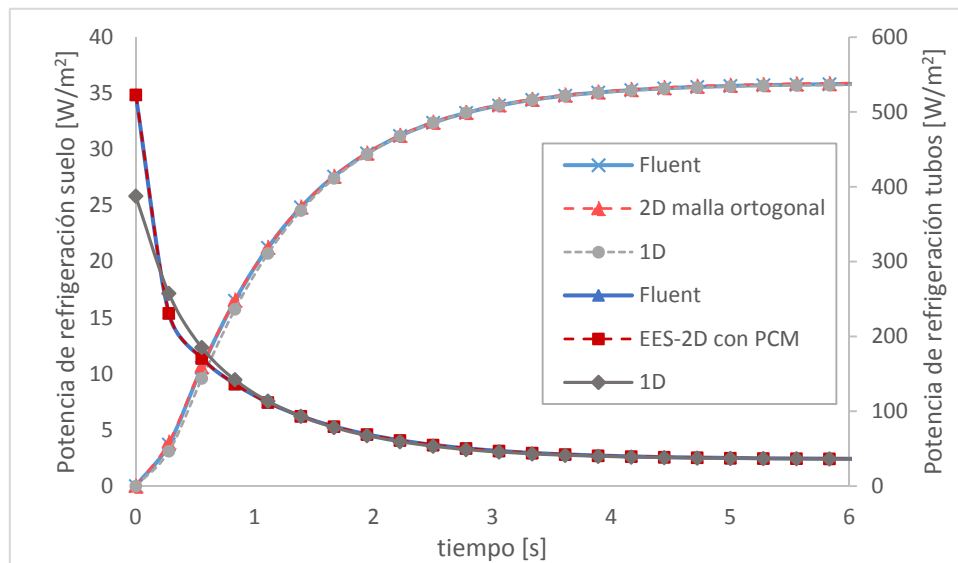


Fig. 5.18. Comparación de la respuesta dinámica obtenida por los tres modelos durante el proceso de puesta en marcha aplicado al suelo radiante sin PCM. (*) La potencia de refrigeración consumida por el suelo radiante se expresa, de la misma manera que la suministrada por el elemento al ambiente interior, por unidad de superficie de suelo.

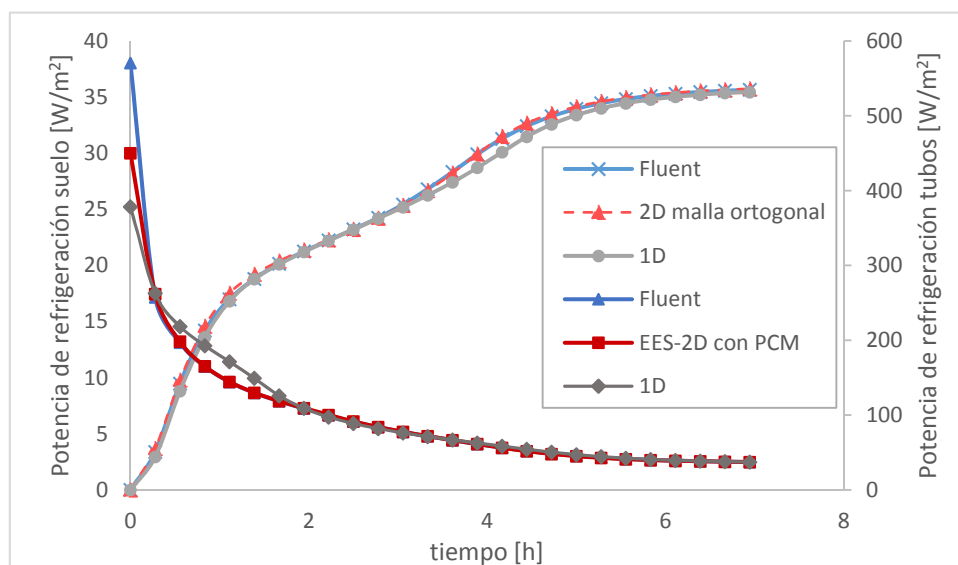


Fig. 5.19. Comparación de la respuesta dinámica obtenida por los tres modelos durante el proceso de puesta en marcha aplicado al suelo radiante con PCM.

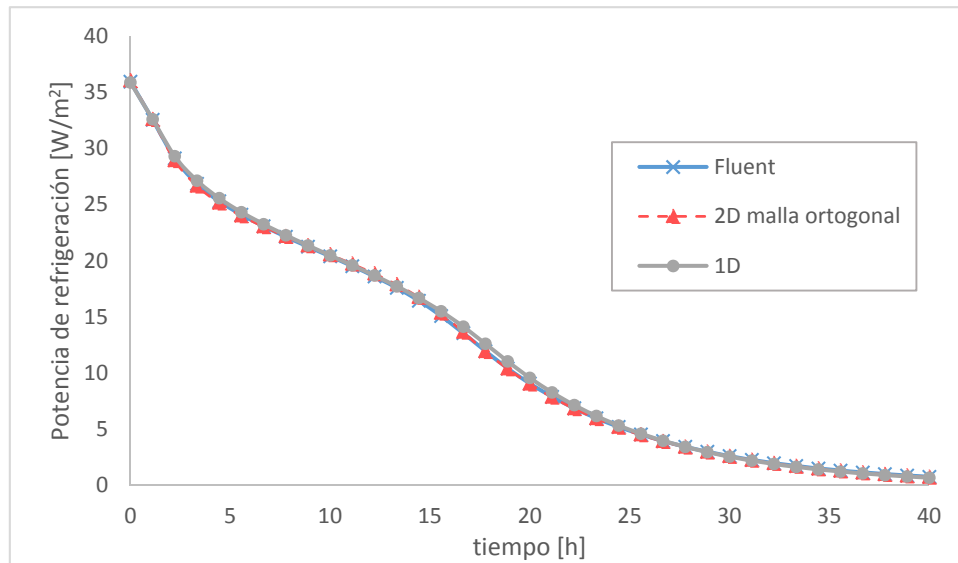


Fig. 5. 20. Comparación de la respuesta dinámica obtenida por los tres modelos durante el proceso de descarga aplicado al suelo radiante con PCM.

Comparativa	PCM	Puesta en marcha		Descarga
		q_{suelo} [W/(m²·K)]	Consumo [W/(m²·K)]	q_{suelo} [W/(m²·K)]
2D Fluent-2D ortogonal	No	0,1 (0,4%)	0,7 (0,6%)	0,1 (0,6%)
2D Fluent-2D ortogonal	Sí	0,2 (1%)	1 (1%)	0,1 (1%)
2D Fluent-1D	No	0,5 (2%)	9 (7%)	0,2 (1%)
2D Fluent-1D	Sí	0,7 (3%)	11 (9%)	0,3 (2%)

Tabla 5. 9. Resumen de las desviaciones (error cuadrático medio) calculadas en la potencia suministrada y consumida durante los procesos de puesta en marcha y de descarga.

5.3.3. Transferencia de calor entre los tubos y la losa

Una vez descritos y analizados los modelos que permiten el cálculo de la conducción del calor a través de la placa de suelo radiante (secciones 5.3.1 y 5.3.2), se completa en este apartado la definición de la herramienta de cálculo mediante la descripción del procedimiento utilizado para la evaluación del intercambio térmico entre el agua que circula por los tubos y el propio elemento.

Este cálculo está basado en dos principales simplificaciones:

- la temperatura del suelo es uniforme a lo largo del circuito de agua
- no se considera la inercia térmica del agua

Estas suposiciones se utilizan también en el modelo desarrollado por Strand y Baumgartner (2005) que fue implementado en EnergyPlus (The EnergyPlus Engineering Reference). De este modo, es posible, a partir de integración la ecuación correspondiente al balance de energía aplicado sobre un tramo diferencial de tubería (Ec. 32) y de la condición

contorno en la entrada del flujo (Ec. 33), calcular la potencia intercambiada entre el mortero y el agua (q_{w-m} , Ec. 34) por unidad de superficie de suelo.

$$\dot{m}_w \cdot c_{p,w} \cdot \frac{\partial T_w}{\partial x} = -\frac{\pi \cdot d_t}{R_{w-m}} \cdot (T_w - T_{s,m}) \quad \text{Ec. 32}$$

$$T_w(x = 0) = T_{e,w} \quad \text{Ec. 33}$$

$$q_{w-m} = \frac{\dot{m}_w \cdot c_{p,w}}{L_t \cdot L} \cdot (T_{e,w} - T_{s,m}) \cdot \left(1 - e^{\frac{\pi \cdot d_t \cdot L_t}{\dot{m}_w \cdot c_{p,w} \cdot R_{w-m}}} \right) \quad \text{Ec. 34}$$

Donde la temperatura de la capa de mortero ($T_{s,m}$) corresponde en el caso del modelo bidimensional al promedio en la frontera asociada, mientras que en el caso del modelo unidimensional se toma la temperatura del nodo situado a la misma profundidad que los conductos. Además, en la ecuación 34 intervienen dos magnitudes geométricas cuya nomenclatura es preciso aclarar ya que puede inducir a la confusión. Por un lado, se utiliza la longitud L de tubería embebida en el elemento activo completo y, por otro lado, aparece la distancia entre tubos que se ha designado L_t .

En el cálculo de la resistencia térmica equivalente entre el fluido y el mortero se tiene en cuenta la convección forzada, para lo cual se utiliza la correlación de Gnielinski (1976), y la resistencia térmica asociada a la conducción del calor en los tubos. Adicionalmente, en el modelo unidimensional se añade la resistencia R_x , definida en el apartado 5.3.1.3, que contempla el efecto de la conducción del calor bidimensional. Así pues, la resistencia térmica total vinculada al intercambio de calor entre el agua y el mortero queda formulada mediante la siguiente ecuación (Ec. 35, particularizada para el modelo unidimensional).

$$R_{w-m} = \frac{1}{h_{conv,w}} \cdot \frac{d_t}{d_t - 2 \cdot e_t} + \frac{d_t}{2 \cdot \lambda_t} \cdot \ln \left(\frac{d_t}{d_t - 2 \cdot e_t} \right) + R_x \cdot \frac{\pi \cdot d_t}{L_t} \quad \text{Ec. 35}$$

5.3.4. Evaluación de la validez del modelo unidimensional

En esta sección se evalúa la exactitud que se obtiene a partir de la aplicación del modelo unidimensional en la simulación de los sistemas y materiales analizados en esta tesis. Como consecuencia del comportamiento no lineal asociado al proceso de cambio de fase, la tarea de asegurar la fiabilidad de este modelo simplificado no resulta obvia. En este caso, la respuesta de los sistemas no sólo depende del tipo de excitaciones de las variables de entrada sino también de la amplitud de éstas. Por consiguiente, los eficientes y sistemáticos estudios basados en el análisis en frecuencia, utilizados por investigadores como Schmidt y Jóhannesson (2004) y Weber et al. (2005) en la verificación de modelos

basados en circuitos térmicos de resistencias y capacidades de elementos termoactivos convencionales, no pueden ser aplicados directamente¹⁴.

En estos sistemas no lineales (con PCM), la aplicación del análisis dimensional y el estudio exhaustivo a través del espacio completo definido por los posibles valores de estas variables adimensionales podría resultar una herramienta útil para la evaluación del rango de validez del modelo unidimensional. Sin embargo, dado que el objetivo en este capítulo se ciñe a la comprobación de la validez del modelo unidimensional para la simulación de los elementos activos analizados en esta tesis, esta verificación se ha limitado a la realización de los siguientes análisis:

- evaluación de la respuesta transitoria frente a los procesos definidos de puesta en marcha y descarga (apartado 5.3.4.1)
- evaluación de la energía almacenada en el sistema en el modo de operación estacionario (apartado 5.3.4.2)
- evaluación de la respuesta de ambos modelos en las condiciones de funcionamiento de una instalación experimental (apartado 5.3.4.3)

5.3.4.1. Análisis de la respuesta transitoria

Se compara en este apartado la respuesta dinámica del sistema de suelo radiante propuesto en la tesis durante los procesos definidos en el apartado 5.3.2.2 de puesta en marcha y descarga.

En la figura 5.21 se muestra la evolución de los principales flujos de calor asociados al consumo y suministro de energía de calefacción durante ambos procesos utilizando diferentes niveles térmicos para el agua (30 y 40°) en el sistema de suelo radiante con un contenido del 25% en PCM. Como se observa, las principales desviaciones se producen durante el proceso de puesta en marcha, en el que la transferencia de calor bidimensional tiene una mayor influencia. Además, estas desviaciones dependen de la temperatura del agua. Los errores, menores en promedio al 5% y 7%, respectivamente, de la potencia de calefacción suministrada y consumida por el elemento, se consideran aceptables para el propósito de esta tesis. En la tabla 5.10 se resumen las diferencias obtenidas a partir de las simulaciones del sistema utilizando diferentes contenidos en PCM (10 y 25%) y niveles de temperatura para el agua (30 y 40°C). Se observan mayores errores conforme aumenta el porcentaje másico del PCM en la muestra. En los materiales de mortero analizados, la presencia de PCM tiene un efecto doble: además del relacionado con el cambio de fase, produce una reducción de la conductividad térmica del material que intensifica el gradiente horizontal de temperaturas en la placa de mortero.

¹⁴ En los sistemas lineales, a partir del análisis de su respuesta en frecuencia y de la aplicación de la transformación de Fourier a las excitaciones a las que se somete el elemento, es posible determinar su respuesta ante cualquier variación de las variables de entrada. De este modo, la comparación entre las respuestas en frecuencia de dos modelos proporciona una información completa acerca de su similitud en la estimación del comportamiento dinámico.

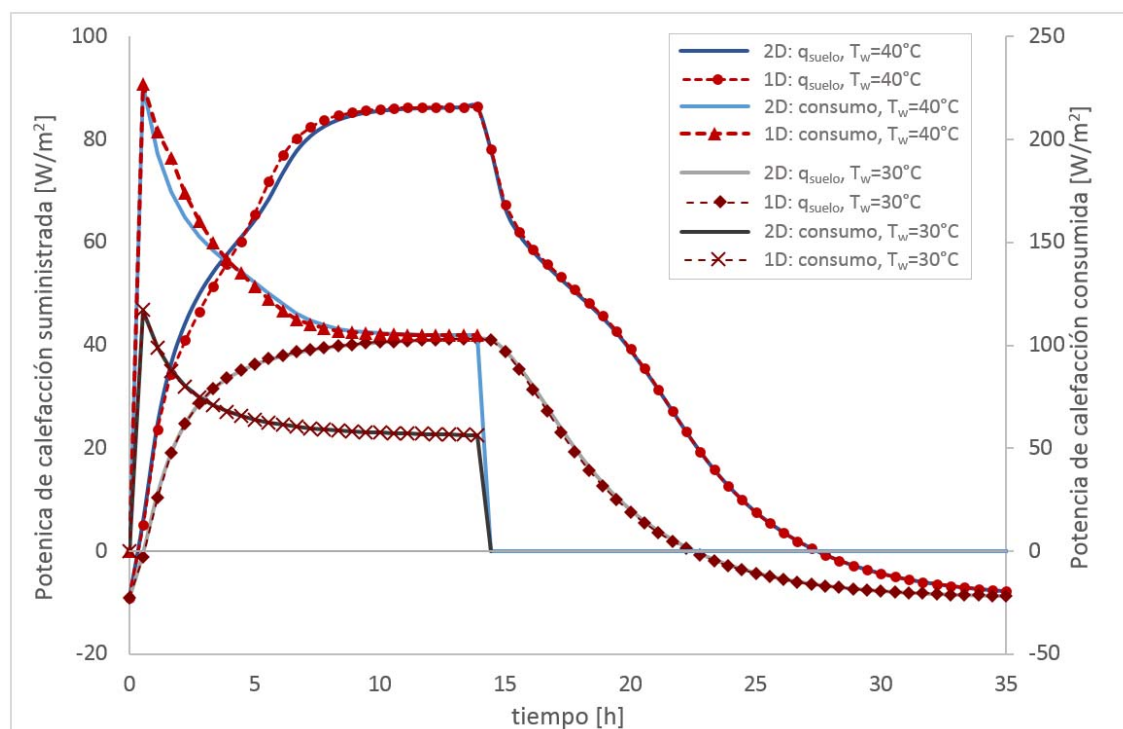


Fig. 5. 21. Comparación de la respuesta dinámica calculada por los modelos 1D y 2D (malla ortogonal).

Simulaciones	Error cuadrático medio				Energía almacenada ($\Delta H_{1D} - \Delta H_{2D}$)/ ΔH_{2D}
	q_{suelo} (puesta en marcha) [W/m²]	q_{suelo} descarga [W/m²]	consumo [W/m²]	pérdidas [W/m²]	
10% $T_w=30^\circ\text{C}$	0,30 (1,2%)	0,08 (0,8%)	0,80 (1,0%)	0,02 (0,2%)	-0,6%
10% $T_w=40^\circ\text{C}$	1,70 (3,0%)	0,23 (0,8%)	5,24 (3,2%)	0,20 (1,2%)	0,3%
25% $T_w=30^\circ\text{C}$	0,34 (1,3%)	0,25 (2,3%)	0,21 (0,3%)	0,02 (0,2%)	-2,1%
25% $T_w=40^\circ\text{C}$	2,34 (4,5%)	0,24 (0,8%)	6,50 (4,0%)	0,32 (2,0%)	0,3%

Tabla 5. 10. Resumen del análisis de las desviaciones producidas por el modelo 1D.

5.3.4.2. Evaluación de la energía térmica almacenada en la situación estacionaria

Otro aspecto importante de la aproximación que supone la utilización del modelo unidimensional, es la evaluación de la energía almacenada por el sistema cuando este opera en el régimen estacionario. Se define esta energía acumulada como la diferencia entre la energía térmica que posee el suelo radiante en una situación en la que suministra una potencia de calefacción en régimen estacionario y la que tendría el mismo elemento si estuviera en equilibrio térmico con el ambiente interior (estado que, por consiguiente, se fija como referencia).

En la situación estacionaria, la introducción de la resistencia ficticia R_x en el modelo unidimensional garantiza la exactitud en el cálculo del flujo de calor suministrado (*vid.* Apartado 5.3.2.1). Asimismo, a partir de la solución analítica utilizada por Koschenz y Lehmann (2000), se puede demostrar que, en el caso de estar compuesta la placa de suelo radiante por un material sin almacenamiento latente, la diferencia en el cálculo de la energía almacenada obtenido mediante ambos modelos (2D y 1D) es prácticamente nula. Sin

embargo, esta conclusión no se puede generalizar cuando la placa posee un cierto contenido en PCM.

El error en la evaluación de la energía almacenada en el elemento ($\Delta H_{2D} - \Delta H_{1D}$), con respecto a la situación de equilibrio térmico, tiene una relación directa con el error promedio en la estimación de la potencia de calefacción suministrada una vez que cesa el aporte de energía ($\bar{q}_{1D,s} - \bar{q}_{2D,s}$). Por ejemplo, si no se consideran pérdidas, se puede demostrar que durante el intervalo de tiempo que comprende la descarga completa de energía se cumple la siguiente relación entre las mencionadas desviaciones (Ec. 36).

$$\bar{e}_{q_s}|_{descarga} = \frac{\bar{q}_{1D,s} - \bar{q}_{2D,s}}{\bar{q}_{2D,s}} = \frac{\int_0^\infty (q_{1D,s} - q_{2D,s}) \cdot dt}{\int_0^\infty q_{2D,s} \cdot dt} = \frac{\Delta H_{2D} - \Delta H_{1D}}{\Delta H_{2D}} = \frac{(\bar{\Delta h}_{1D} - \bar{\Delta h}_{2D}) \cdot e_s}{\bar{\Delta h}_{2D} \cdot e_s} = \frac{\bar{\Delta h}_{1D} - \bar{\Delta h}_{2D}}{\bar{\Delta h}_{2D}}$$

Ec. 36

Así pues, se plantea para el caso más desfavorable -mortero con un 25% de PCM- la influencia de la distancia entre tubos en la energía almacenada en la mencionada situación. Si se analiza el planteamiento desde un punto de vista adimensional se pueden identificar, si no se consideran pérdidas, las siguientes variables adimensionales puramente geométricas que intervienen en la distribución de temperaturas: a/L_t , a/d_t y e_s/d_t . Se mantiene en estas definiciones la nomenclatura correspondiente a las magnitudes geométricas presentadas anteriormente en la figura 5.15. La variación entre distintos sistemas de suelo radiantes convencionales de las relaciones a/d_t y e_s/d_t es pequeña, de modo que la distancia entre tubos (L_t) es la principal magnitud relacionada con las posibles desviaciones en la estimación de la energía térmica almacenada en este tipo de elementos para un material con PCM concreto.

Se analiza por tanto el cálculo de la variación de energía entre la situación de equilibrio térmico con el ambiente (no se consideran en este análisis las pérdidas) y el estacionario que se establece en el elemento activo cuando circula agua a una temperatura T_w . De esta manera, se puede definir variación entalpía, promediada sobre el dominio del problema que ocupa el material con PCM mediante las ecuaciones 37 y 38. Cada una de ellas corresponde al modelo unidimensional y bidimensional, respectivamente.

$$\bar{\Delta h}_{1D}|_{T_0, T_w} = \frac{\int_0^{y=e_m+PCM} [h_{m-PCM}(T(y)|_{T_w}) - h_{m-PCM}(T_0)] \cdot L(y) \cdot dy}{\int_0^{y=e_m+PCM} L(y) \cdot dy} \quad Ec. 37$$

$$\bar{\Delta h}_{2D}|_{T_0, T_w} = \frac{\int_A [h_{m-PCM}(T(x,y)|_{T_w}) - h_{m-PCM}(T_0)] \cdot dx \cdot dy}{\int_A dx \cdot dy} \quad Ec. 38$$

En la figura 5.22 se muestra la comparativa de la variación con la temperatura del agua (T_w) de la energía almacenada en la situación estacionaria para distintos espaciados entre tubos en el sistema de suelo radiante conformado con mortero y un 25% de PCM. En la configuración con una distancia entre tubos de 200mm se observan desviaciones

cercanas al 10%, que pueden producir errores importantes tanto en el cálculo de la capacidad de almacenamiento del sistema como en la evaluación de la potencia suministrada.

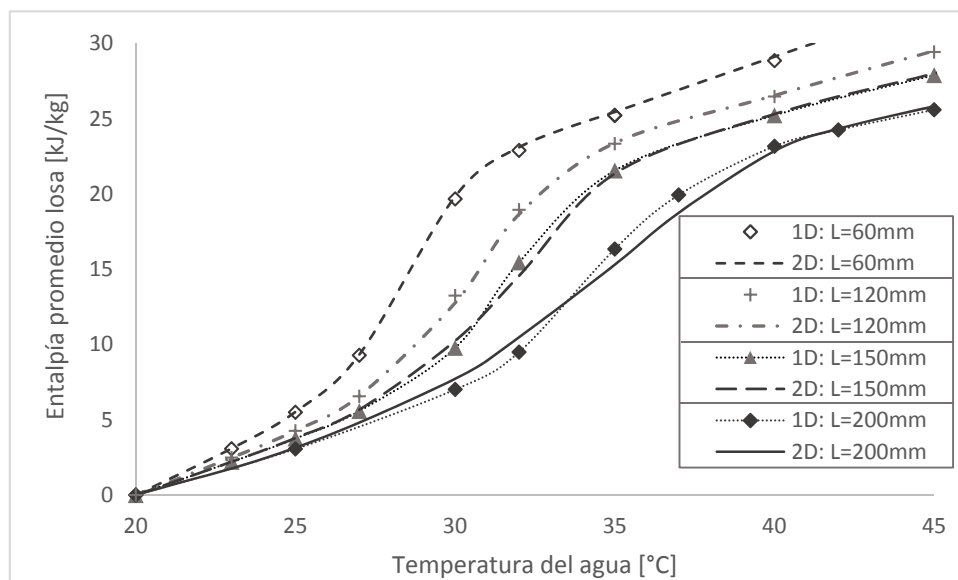


Fig. 5. 22. Comparación de la variación de entalpía promedio de la losa de suelo radiante, en función de la temperatura del agua.

Así pues, se puede establecer, en base a este criterio, un límite del rango de validez del modelo unidimensional asociado a una separación entre tubos de 150mm. Este límite depende de la geometría concreta del sistema y de las propiedades del material: principalmente la conductividad térmica y el contenido en PCM. Es por tanto necesario en cada caso comprobar la adecuación de estos modelos simplificados para la simulación de la transferencia de calor bidimensional transitoria.

5.3.5. Integración del modelo en el global de transferencia de calor en zonas de edificios

En este apartado se analiza la transferencia de calor sobre la superficie del suelo radiante una vez integrado en el modelo completo de simulación de pequeños edificios (descrito en la sección 5.1). La emisión térmica desde este elemento se realiza mediante los fenómenos de transferencia de calor de radiación de onda larga (hacia el resto de superficies) y de convección con el aire interior. El primer objetivo de esta sección es comparar el valor de los coeficientes equivalentes de transferencia de calor correspondientes a cada fenómeno con los habitualmente aceptados o determinados experimentalmente.

Se estudia en primer lugar el coeficiente de transferencia de calor equivalente por radiación. Es necesario para su cálculo la determinación del salto de temperaturas equivalente. Se tomará el criterio definido por Olesen et al. (2000), que utiliza la diferencia de temperaturas entre la superficie del suelo y el entorno radiante (AUST [K], según la nomenclatura de los autores). La temperatura del entorno se puede calcular de forma

aproximada a partir del promedio definido por la ecuación 39, donde F_{si} son los factores de vista, desde la superficie del suelo, del resto de paredes y techo. Una vez definida esta diferencia de temperaturas se obtiene el coeficiente equivalente (Ec. 40) a partir del flujo de calor que calcula el módulo del modelo encargado de la evaluación del intercambio de radiación de onda larga entre las superficies interiores (*vid.* Sección 5.1.2.2).

$$AUST = \sqrt[4]{\sum_{i=1}^n F_{s,i} \cdot T_i^4} \quad \text{Ec. 39}$$

$$h_r = \frac{q_{LW,s}}{(T_a - AUST)} \quad \text{Ec. 40}$$

En el rango de temperaturas habitual en las simulaciones efectuadas, este coeficiente adopta un valor, prácticamente constante, de $5,5 \pm 0,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Se considera que todas las superficies tienen una emisividad para la radiación de onda larga de 0,9. Tal y como se muestra en la tabla 5.11, este valor coincide con las medidas experimentales de Causone et al. (2009), Cholewa et al. (2013) y Koca et al. (2014), los resultados de Acikgoz (2015) (basado en el mismo modelo teórico que la herramienta de simulación desarrollada) y los propuestos por la norma EN 15377-1 (2009) y Olesen et al. (2000). Asimismo, tanto las medidas experimentales como los resultados teóricos confirman la pequeña variabilidad de este coeficiente en el rango de temperaturas habituales en esta aplicación (Causone et al. 2009, Cholewa et al. 2013, Koca et al. 2014, Acikgoz 2015).

Trabajo	Metodología	Sistema	h_r [W/(m ² ·K)]	h_{conv} [W/(m ² ·K)]
Min et al. (1956)	Experimental	Suelo radiante	-	$2,416/D^{0,08} \cdot \Delta T^{0,31}$
Awbi y Hatton (1999)	Experimental	Suelo radiante	-	$2,175/D^{0,076} \cdot \Delta T^{0,308}$
Causone et al. (2009)	Experimental	Techo radiante y refrescante	5,6	(*)
Andrés-Chicote et al. (2012)	Experimental	Techo refrescante ($\epsilon_t=0,8$)	5,4	(*)
Cholewa et al. (2013)	Experimental	Suelo radiante	5,4-6,2	$0,76 \cdot h_{conv-AWBI\&HATTON}$
		Suelo refrescante	4,9-5,2	(*)
Koca et al. (2014)	Experimental	Pared radiante	5,4-5,6	(*)
Acikgoz (2015)	Numérico: Oppenheim (1956); $\epsilon_{LW}=0,9$	Pared radiante	5,4-5,5	(*)

Tabla 5. 11. Recopilación de los trabajos experimentales y numéricos dedicados a la determinación de los coeficientes de transferencia de calor (radiación y convección natural) sobre superficies interiores con sistemas de calefacción o refrigeración integradas. (*) No se presentan en tabla las correlaciones para el cálculo del coeficiente de convección indicadas ya que el sistema físico no se corresponde con el del suelo radiante.

Por otro lado, se comparan en la figura 5.23 distintas correlaciones –dentro del rango habitual de la diferencia de temperaturas entre la superficie del suelo y el aire– obtenidas en trabajos anteriores a partir de la experimentación con suelos con calefacción integrada (Min et al. 1956, Awbi y Hatton 1999 y Cholewa et al. 2013) con la inicialmente utilizada en el modelo (Walton 1983 y ASHRAE 2001). Ésta última no fue desarrollada de manera específica para el sistema de suelo radiante y su elección estuvo condicionada por el proceso de verificación llevado a cabo sobre el modelo (sección 5.2). Se añade además a esta comparación la correlación de Almandari y Hammond (1983), propuesta a su vez por el EnergyPlus para el cálculo del coeficiente de convección natural sobre suelos con calefacción integrada (The EnergyPlus Engineering Reference, 2014). Se observa una desviación de $\pm 18\%$ entre las predicciones que proporcionan las correlaciones específicas para suelos radiantes. En términos del coeficiente global de transferencia de calor, esta variabilidad de estimaciones, se traduce en aproximadamente una dispersión de un $\pm 7\%$. El posible error en la estimación del coeficiente de transferencia de calor por convección se tendrá en cuenta en el análisis de propagación de incertidumbres que se aplica sobre los resultados numéricos de la simulación del sistema de suelo radiante con PCM (*vid.* Capítulo 7, sección 7.5). Para los cálculos que se presentan a continuación (sección 5.3.5.1) se ha escogido la correlación de Awbi y Hatton (1999), habitualmente utilizada para la simulación de estos componentes.

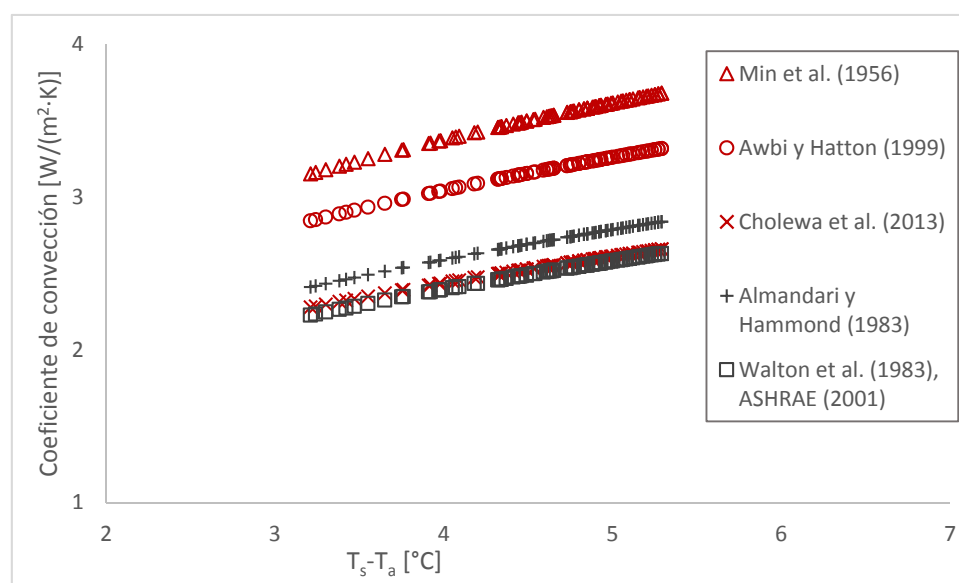


Fig. 5. 23. Comparación de distintos coeficientes de convección propuestos en trabajos anteriores.

5.3.5.1. Evaluación de la respuesta de los modelos integrada con el resto de elementos de construcción

Finalmente, se propone la comparación de la respuesta proporcionada por ambos modelos, unidimensional y bidimensional, cuando son sometidas a las condiciones de contorno más realistas. Éstas se han tomado de las simulaciones realizadas en el capítulo 7 sobre la evaluación del funcionamiento del sistema de suelo radiante con PCM en una instalación experimental.

A partir de los resultados obtenidos de la simulación del cubículo experimental con suelo radiante, realizada con el modelo unidimensional, se han tomado las condiciones de contorno (temperaturas del aire y media radiante interior -AUST-, temperatura exterior, flujo y temperatura de entrada del agua en los tubos) y se han aplicado sobre el modelo bidimensional. En la figura 5.24 se muestra la temperatura exterior del día tipo escogido junto con las temperaturas del aire interior en los tres casos analizados (correspondientes a un contenido de 0, 10 y 25% de PCM en el mortero).

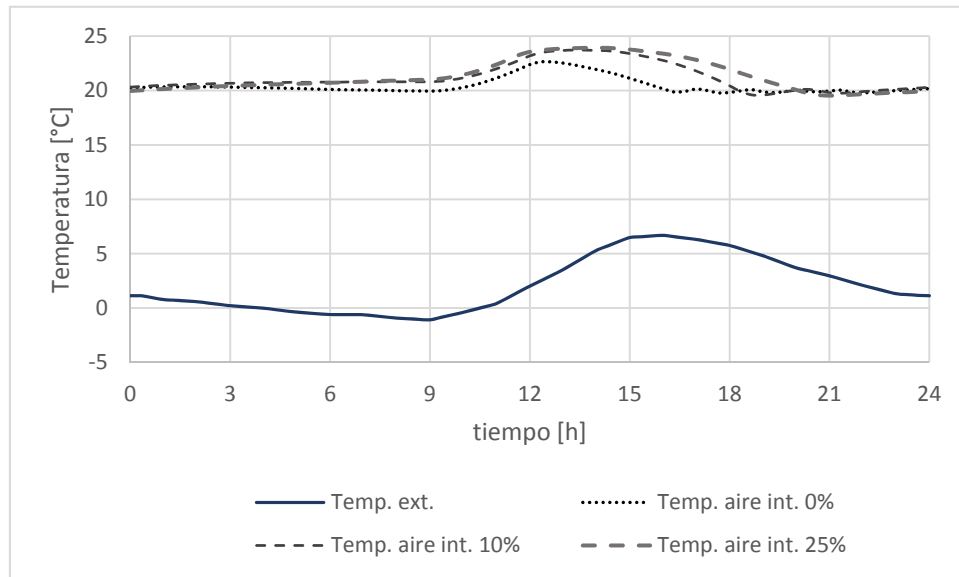


Fig. 5. 24. Evolución de la temperatura interior de los casos analizados.

En las figuras 5.25, 5.26 y 5.27 se muestra la comparación entre los flujos de calor correspondientes al consumo de energía, al aporte de energía para la calefacción y a las pérdidas que se obtienen a partir de ambos modelos en los tres casos mencionados. Asimismo en la tabla 5.12 se resumen los principales datos relacionados con esta comparación. En todas las simulaciones se observa un buen ajuste de la energía de calefacción suministrada por el suelo radiante y de las pérdidas a través del material aislante; las diferencias son menores al 5%. Se observan mayores desviaciones en el cálculo de la potencia consumida por el elemento (en torno al 10%). Sin embargo en el balance diario energético global las diferencias son en todos los casos inferiores al 2%.

Por tanto, a partir de los resultados de esta última verificación se considera que el modelo unidimensional introduce unas desviaciones aceptables cuando opera bajo las condiciones de contorno propias de los estudios numéricos que se han realizado en esta tesis (presentados con detalle en el capítulo 7).

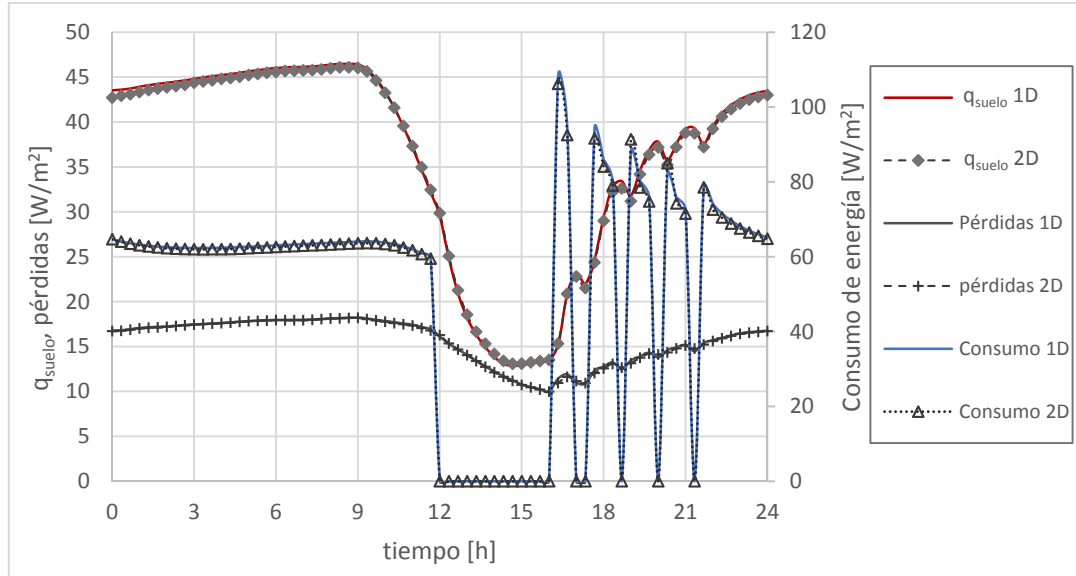


Fig. 5.25. Comparación de los resultados de ambos modelos para la simulación del funcionamiento del sistema de suelo radiante sin PCM integrado en los cubículos experimentales definidos en el capítulo 7.

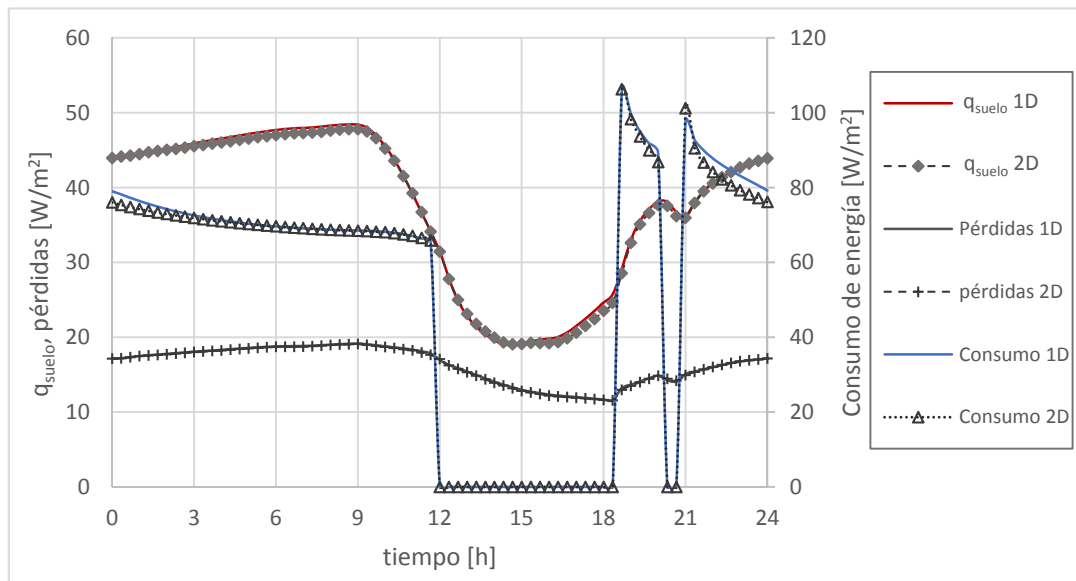


Fig. 5.26. Comparación de los resultados de ambos modelos para la simulación del funcionamiento del sistema de suelo radiante con un 10% de PCM integrado en los cubículos experimentales definidos en el capítulo 7.

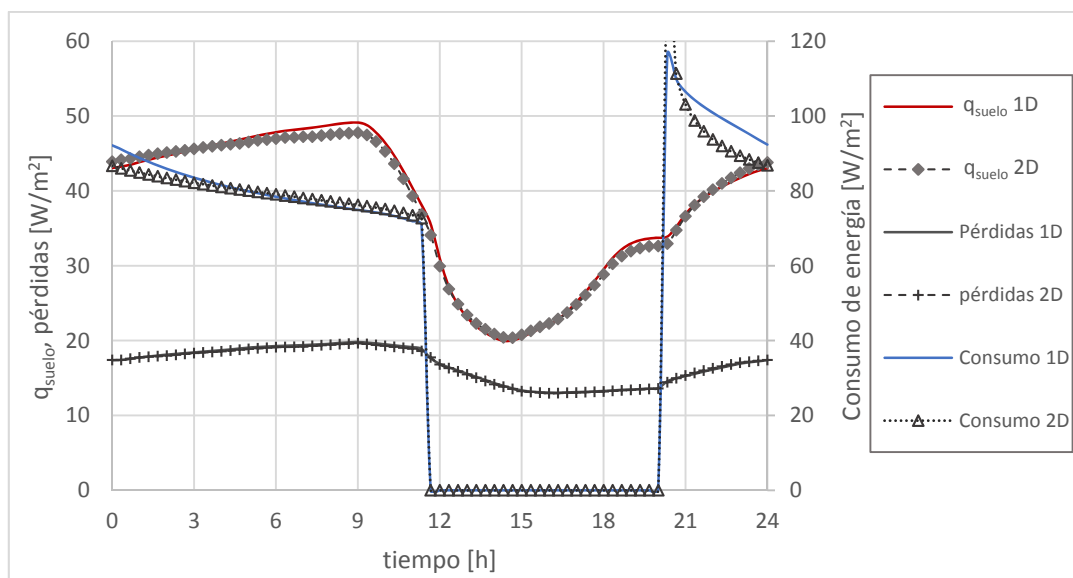


Fig. 5. 27. Comparación de los resultados de ambos modelos para la simulación del funcionamiento del sistema de suelo radiante con un 25% de PCM integrado en los cubículos experimentales definidos en el capítulo 7.

Contenido en PCM	0%	10%	25%
Consumo diario de energía	0,5%	1,0%	1,2%
Potencia de consumo (MSRD) [W/m²]	1,0 (2,0%)	1,8 (3,4%)	4,6 (8,5%)
Suministro de energía	0,7%	0,8%	0,8%
Flujo de suelo calor (MSRD) [W/m²]	0,3 (0,9%)	0,4 (1,0%)	0,7 (1,9%)
Pérdidas	0,3%	0,4%	0,5%
Flujo de calor pérdidas (MSRD) [W/m²]	0,1 (0,7%)	0,1 (0,4%)	0,1 (0,6%)

Tabla 5. 12. Tabla resumen sobre las desviaciones producidas en la respuesta térmica de ambos modelos de suelo radiante (1D y 2D).

5.4. Conclusiones del capítulo

En este capítulo se ha descrito la herramienta de cálculo que permite la simulación integrada dentro del edificio de los modelos de simulación de elementos de construcción termoactivos con PCM. Simula la transferencia de calor en construcciones de geometría sencilla compuestas de una o pocas zonas. En ella, los principales fenómenos de transferencia de calor presentes en un edificio –conducción a través de los cerramientos, intercambio de calor mediante radiación de onda corta y larga y la convección interior y exterior- se han estudiado con un nivel de detalle similar al de los programas que actualmente se utilizan para la simulación de PCM dentro de la edificación.

Aunque en relación a las posibilidades y capacidades de estos últimos, el modelo desarrollado presenta ciertas limitaciones, especialmente si se aborda la tarea de simular un edificio real, puede resultar una herramienta muy útil para el estudio del comportamiento de nuevos elementos de construcción activos o pasivos de manera conjunta con el resto del edificio. En este sentido, el programa presenta una mayor flexibilidad y comodidad en el proceso de implementación de los estos nuevos modelos.

En el capítulo se ha descrito el procedimiento llevado a cabo para la verificación de la herramienta de simulación desarrollada. Además de las pruebas para la verificación de cada módulo de cálculo que compone el modelo global, que han sido realizadas de manera coordinada durante proceso de elaboración del mismo, se ha aplicado la metodología BESTEST que se ocupa del análisis de la transferencia de calor en la estructura del edificio (Judkoff y Neymark, 1995). Este procedimiento permite la intercomparación sistemática y el diagnóstico de fallos en los algoritmos de los modelos de simulación energética de edificios.

La aplicación del método ha mostrado cómo los resultados del modelo concuerdan con los rangos de aceptación establecidos. Debido a que estos criterios no han sido hasta el momento actualizados, se ha añadido a la intercomparación una versión reciente de EnergyPlus. Las desviaciones con respecto a este programa, si se implementan las mismas correlaciones para el cálculo del coeficiente de convección exterior, son mínimas (<5%).

Por otro lado, la aplicación del método secuencial para el diagnóstico de errores ha permitido el análisis de los distintos mecanismos de transferencia de calor. En comparación con los programas de simulación basados en modelos similares, se obtiene un comportamiento del modelo satisfactorio, tanto en los resultados como en la sensibilidad frente a la activación de estos mecanismos de transferencia de calor.

Por último, en este capítulo se han descrito los modelos utilizados para el estudio de la transferencia de calor bidimensional en un sistema de suelo radiante con PCM integrado en la placa de mortero como el que se propone en esta tesis. Se ha trabajado con modelos que describen la geometría del elemento con diferente nivel de precisión con el objetivo de analizar la influencia de estas simplificaciones asociadas en la predicción del comportamiento dinámico de este tipo de elementos con almacenamiento latente. Los modelos utilizados son los siguientes:

- modelo bidimensional resuelto mediante el método de volúmenes finitos (implementado en Fluent 6.0)
- modelo bidimensional basado en una malla ortogonal formulado mediante diferencias finitas
- modelo unidimensional basado en la aproximación propuesta por Koschenz y Lehmann (2000)

Mediante la verificación a través del contraste con la solución analítica en la situación estacionaria y de la intercomparación de ambos modelos bidimensionales (en las situaciones estacionaria y transitoria, con almacenamiento sensible y latente), se ha observado que la simplificación de la geometría que utiliza el modelo 2D-ortogonal introduce errores irrelevantes.

Por otra parte, se ha seleccionado el método de la entalpía con el fin de reducir los errores relacionados la evaluación discreta de la variación temporal de energía térmica. Si se utilizan los métodos del calor específico equivalente propuestos, estos errores se amplifican hasta niveles inaceptables cuando se emplean tiempos de paso habituales en modelos de simulación de edificios (1200s).

Asimismo, el modelo unidimensional, basado en la aproximación de Koschenz y Lehmann (2000), ha mostrado un buen ajuste a los resultados de los modelos bidimensionales en el caso base de estudio. Sin embargo, se ha estimado conveniente ampliar el número de comprobaciones de tal manera que se pueda tener una estimación fiable de su validez para la simulación de los sistemas de suelo radiante propuestos en esta tesis.

La comparación con el modelo bidimensional tanto en los procesos transitorios definidos (puesta en marcha y descarga) como en las condiciones propias de funcionamiento de las simulaciones realizadas en esta tesis, muestra la aproximación razonable que supone la utilización del modelo unidimensional. Por otro lado, se ha observado cómo la aproximación de Koschenz y Lehmann (2000), pese a que implica, en la situación estacionaria, la estimación de un flujo de calor idéntico con respecto a la solución del modelo bidimensional, no asegura la igualdad en el cálculo de la energía térmica almacenada si el material de la placa de suelo radiante contiene PCM. A partir del análisis de esta observación, se ha establecido un límite de 150mm para la separación entre los tubos en los sistemas (y materiales) propuestos en esta tesis. A partir de esta distancia, los errores relativos en estimación de la energía almacenada en el suelo radiante en la situación estacionaria superan el 5%. Estas desviaciones se trasladan de manera directa al cálculo de la potencia de calefacción durante el proceso de descarga. Resulta conveniente en cada caso analizar este hecho, cuando se pretende simular un elemento activo mediante un esquema unidimensional. De este modo, ésta comprobación puede ser proporcionar un criterio sencillo para la aceptación de este modelo simplificado.

Capítulo 6. Aplicación de la metodología de análisis de sensibilidad y de propagación de incertidumbres

6.1. Introducción

El objetivo de este capítulo es presentar la metodología que se utiliza en esta tesis para el análisis de la influencia de los errores en la medida de las propiedades termofísicas de los PCM sobre las estimaciones que proporcionan los modelos numéricos. El estudio está principalmente motivado por la inexactitud, en muchas ocasiones apreciable, asociada a las medidas de las propiedades de los PCM (*vid.* Capítulo 1, sección 1.5). Aunque existen ciertas metodologías experimentales ampliamente aceptadas, tales como el DSC y el método T-history para la determinación de la curva entalpía-temperatura, algunos autores (p. ej. Lázaro et al. 2013) han llamado la atención sobre las discrepancias en estas medidas entre distintos trabajos de investigación. Estos errores suelen ir asociados a las características particulares del comportamiento de los PCM que dificultan este trabajo. Frecuentemente están relacionados con fenómenos asociados a la cristalización -subenfriamiento e histéresis- o, en calorimetría, con la acentuación de los gradientes térmicos en la muestra durante el proceso de cambio de fase (Lázaro et al. 2013). Además, dentro del ámbito específico de los materiales compuestos de construcción que incorporan PCM, no existe un acuerdo claro sobre las metodologías para la determinación de la curva entalpía-temperatura. Reconociendo esta realidad, y teniendo en cuenta la relevancia de la exactitud en la medida de las propiedades de los PCM en las evaluaciones numéricas, Günther et al. (2009) definieron ciertos niveles de tolerancia para medidas relacionadas con la curva entalpía-temperatura ($\delta\Delta h/\Delta h < \pm 10\%$, $\delta T < \pm 1^\circ\text{C}$) a partir de una estimación sencilla aplicada a un sistema genérico de almacenamiento latente para el cual se aceptaba un error del $\pm 10\%$ en los resultados.

La consideración de estos posibles errores en los estudios numéricos puede ser, por tanto, una cuestión relevante. No obstante, en pocos de los numerosos trabajos publicados sobre la evaluación teórica del comportamiento de sistemas con PCM, se tiene en cuenta este hecho. Algunos investigadores se han centrado sobre el estudio de la repercusión de alguno de estos posibles errores en particular. Por ejemplo, Arkar et al. (2005) analizaron la influencia del uso de diferentes curvas entalpía-temperatura, obtenidas a partir de varias velocidades en los ensayos realizados con DSC, en los resultados numéricos de un modelo para la simulación de un intercambiador de calor PCM-aire. Concluyeron que las curvas correspondientes a velocidades empleadas más bajas (0,1K/min) producían una mejor estimación -en relación a observación empírica- de los resultados. Atribuyeron este hecho a la similitud entre la velocidad utilizada en el método DSC y la experimentada por el PCM en el intercambiador de calor. En los trabajos más recientes de Dumas et al. (2014) y Tittlein et al. (2015) se analiza la repercusión en las simulaciones de la utilización de las curvas de calor específico aparente obtenidas a partir de la calorimetría. Los resultados muestran los significativos errores que provocan las curvas extraídas directamente de ensayos DSC realizados a una velocidad relativamente alta (2-10K/min). Por el contrario,

defienden el uso para la simulación del PCM de modelos teóricos basados en el comportamiento de las sustancias puras o de las mezclas de dos componentes (como el descrito en Franquet et al. 2012). Por otro lado, dentro del ámbito de la aplicación de los PCM en la edificación, Tabares-Velasco (2012) analizó la influencia de la precisión en la definición de la curva entalpía-temperatura, como dato de entrada para un programa de simulación energética de edificios, en la estimación del consumo de energía. Obtuvo una recomendación acerca del nivel de precisión necesario a partir del análisis de un caso particular.

En otros trabajos, los autores contemplan un conjunto más amplio de posibles errores en sus estudios teóricos. Por ejemplo, Dolado et al. (2012) llevaron a cabo un análisis de sensibilidad y de propagación de incertidumbres a los resultados de un modelo para la simulación de un intercambiador de calor PCM-aire. En su caso, el estudio se aplicó en la validación empírica del modelo. Por su parte, Zsembinski et al. (2014) aplicaron un análisis de sensibilidad, teniendo en cuenta las incertidumbres de las variables de entrada de un modelo de simulación de un intercambiador PCM-agua, basado en el estudio de la influencia en los resultados de la variación independiente de cada una de estas variables consideradas.

Dentro del campo de la simulación energética de edificios, donde los modelos cuentan con una elevada cantidad de variables de entrada sujetas a una incertidumbre significativa, el análisis de sensibilidad y de propagación de incertidumbres ha suscitado un creciente interés en las últimas décadas. La metodología se ha utilizado con diferentes propósitos, tales como la evaluación del comportamiento del edificio durante la etapa de diseño (Macdonald y Strachan 2001, de Wit y Augenbroe 2002, Hopfe y Hensen 2011), el dimensionamiento de los equipos de calefacción y refrigeración (Domínguez-Muñoz et al. 2010) o la validación experimental (Lomas et al. 1997, Palomo del Barrio y Guyon 2004, Spitz et al. 2012). Sin embargo, sólo en el trabajo de Guichard et al. (2014) se ha aplicado un método global de análisis de sensibilidad (FAST, *Fourier Amplitude Sensitivity Analysis*, Saltelli 2004) a un caso en el que el PCM está incluido en los elementos de construcción. En este caso, el análisis se aplicó dentro de la primera etapa de validación de un modelo de simulación de un cubículo experimental que integraba una capa de PCM en su cubierta. Los autores consideraron, sin tener en cuenta *a priori* la incertidumbre asociada a las variables de entrada, rangos de variación de entre el 10 y el 50% para cada una de ellas. Aunque se obtuvo una influencia relevante de las propiedades del material en la evolución de la temperatura en el tejado, los autores consideraron que la metodología DSC proporcionaba una exactitud suficiente para su propósito.

A modo de resumen, con el objetivo de contextualizar el trabajo presentado en este capítulo, se presentan en la siguiente tabla (tabla 6.1) las principales aplicaciones del análisis de sensibilidad y propagación de incertidumbre en el campo de los sistemas de almacenamiento térmico con PCM. Además de los trabajos ya mencionados, dedicados al estudio de la influencia de distintos errores en los resultados numéricos, existe un amplio número de publicaciones en los que se emplea el análisis de sensibilidad (con objetivos relacionados con el diseño del sistema térmico (en la tabla 6.1 se proporcionan algunos ejemplos).

En general, los análisis de sensibilidad y de propagación de incertidumbres empleados hasta el momento están frecuentemente basados en un enfoque local (según la clasificación de Saltelli 2004 y MacDonald 2002) y, por tanto, no contemplan el efecto de la interacción entre las variables ni permiten la obtención de la distribución de probabilidad de los errores numéricos obtenidos. Tan sólo se ha encontrado el trabajo de Guichard et al. (2014), además del elaborado en la Universidad de Zaragoza por Dolado et al. (2012), donde el análisis de sensibilidad se aborda a partir de un método global.

Análisis	Rango de variación de los parámetros	Método	Objetivos
Análisis de sensibilidad o paramétrico (p. ej. Lin et al. 2004, Xu et al. 2005, Royon et al. 2014, Váz Sá et al. 2014)	-Intervalo de valores realista en los parámetros de diseño	Variación independiente de los parámetros (<i>one-at-time</i>)	-análisis del comportamiento del sistema (Lin et al. 2004, Xu et al. 2005) -identificación de las variables más influyentes (Xu et al. 2005) -diseño/optimización (Royon et al. 2014) -selección del PCM (Váz Sá et al. 2014)
Propagación de errores (Arkar et al. 2005, Dumas et al. 2014, Tittlein et al. 2015)	-curvas h-T obtenidas a distintas velocidades del DSC (Arkar et al. 2005, Dumas et al. 2014, Tittlein et al. 2015) -modelos teóricos de simulación PCM (Dumas et al. 2014, Tittlein et al. 2015)	Variación independiente de los parámetros (<i>one-at-time</i>)	-análisis de la repercusión sobre los resultados numéricos de la velocidad de ensayo utilizada en calorimetría y del modelo de simulación del PCM
Propagación de incertidumbres (Zsembinski et al. 2014)	-incertidumbre variables de entrada del modelo	Variación independiente de los parámetros (<i>one-at-time</i>)	-estimación del rango de variación de los resultados -validación empírica del modelo
-Propagación de incertidumbres y análisis de sensibilidad (Dolado et al. 2012)	-incertidumbre variables de entrada del modelo	Métodos globales (Saltelli 2004): -Montecarlo	-Incertidumbre resultados -validación empírica del modelo -identificación de las variables más influyentes
-Análisis de sensibilidad (Guichard et al. 2014)	-rango de variación 10-50% (arbitrario)	Métodos globales (Saltelli 2004): -FAST	-identificación de las variables más influyentes

Tabla 6. 1. Tabla resumen de los trabajos publicados sobre la aplicación del análisis de sensibilidad y de propagación de incertidumbres a sistemas con PCM.

6.1.1. Objetivos

Los objetivos específicos de la aplicación del análisis de sensibilidad y propagación de incertidumbres son los siguientes:

- cuantificar la incertidumbre de los resultados numéricos causada por los errores asociados a la medida de las propiedades termofísicas del PCM
- estudiar la sensibilidad de dicha incertidumbre frente al error asociado a la medida de cada propiedad
- calcular la exactitud requerida en las medidas de tal manera que error en los cálculos se reduzca hasta un determinado nivel

Teniendo en cuenta estos objetivos, se ha utilizado un método de análisis global basado en técnicas Montecarlo. La metodología se describe en los apartados 6.2 e 6.4.3.

6.1.2. Marco de trabajo y selección del caso de estudio

En este capítulo se ha seleccionado un primer caso de análisis sencillo. En él, se integra el PCM dentro de los cerramientos de un muro convencional de doble hoja de ladrillo instalados en un cubículo experimental.

La aplicación de la esta metodología a este caso particular surge, dentro del ámbito de los proyectos del Plan Nacional ENE2011-28269-C03-01 and ENE2011-28269-C03-03, como un trabajo de colaboración entre la Universidad Rovira i Virgili y la Universidad de Zaragoza. Así, el caso base seleccionado corresponde con las celdas experimentales descritas en el trabajo de Castell et al. (2010) instaladas por la Universitat de Lleida. Esta metodología experimental, basada en el análisis de la respuesta térmica de cubículos, se ha utilizado frecuentemente para el estudio de los primeros prototipos de distintos sistemas constructivos que incorporan PCM (p. ej. losas de cubierta con PCM macroencapsulado, Pasupathy et al. 2008; integración del PCM en una fachada transventilada, Romero-Sánchez et al. 2012 o en muros de ladrillo, Kong et al. 2013).

En esta aplicación, el almacenamiento térmico se aprovecha de forma pasiva, con el objetivo de reducir el consumo en refrigeración y calefacción o suavizar la fluctuación diaria de temperaturas a través del aumento de la inercia térmica de los cerramientos. La incorporación de PCM en cerramientos de ladrillo ha despertado el interés de entre los investigadores. Castell et al. (2010) mostraron experimentalmente, a partir del estudio del comportamiento de cubículos experimentales, la capacidad del material para reducir la oscilación térmica interior y reducir el consumo en refrigeración (que se cuantificó en un 15%). Por su parte, Vicente et al. (2014) ensayaron distintas configuraciones de muro de ladrillo con macrocápsulas en una instalación experimental destinada al análisis del comportamiento dinámico de cerramientos. El PCM era capaz de reducir la oscilación térmica de la superficie interior un 50%. Desde el punto de vista numérico, Izquierdo-Barrientos et al. (2012) estudiaron de forma aislada el efecto de la incorporación de PCM a diferentes sistemas de muro tradicionalmente utilizados en España sobre el flujo de calor que lo atravesaba. Destacaron que en estos casos la inercia térmica adicional podía acarrear algún efecto negativo, como la liberación, en verano de la energía almacenada en el PCM durante las horas de sol.

6.2. Método Montecarlo

Se ha utilizado un método basado en los análisis Montecarlo para el cálculo de la propagación de incertidumbre a través del modelo numérico. Se trata, desde el punto de vista de su implementación, de un método externo, según la clasificación establecida por MacDonald (2002). En él, el análisis se realiza a través de los resultados obtenidos por el modelo a partir de una muestra representativa del espacio completo formado por los posibles valores de los datos de entrada. No precisa, por tanto, de modificaciones sobre el

modelo numérico. El método presenta la ventaja de permitir, gracias a la simulación de un conjunto de casos, el cálculo de la propagación de incertidumbres y la evaluación de la sensibilidad frente a cada parámetro de entrada.

Según este procedimiento matemático, cada parámetro de entrada afectado por un determinado nivel de incertidumbre se considera una variable aleatoria y, por tanto, se le asigna una determinada función de densidad de probabilidad (en el caso de variables continuas). A partir de esta caracterización de las variables aleatorias, se realiza un muestreo de un conjunto representativo de casos de estudio. El posterior análisis estadístico de los resultados obtenidos a partir de esta muestra proporciona una estimación de la función de densidad de probabilidad asociada a las variables de salida del modelo. En este caso, se ha utilizado para este propósito el método de muestreo del Hipercubo Latino (LHS, *Latin Hypercube Sampling*) (McKay et al. 2000). Esta metodología de muestreo se utiliza frecuentemente en los análisis Montecarlo debido a su mayor eficiencia. McKay et al. (2000) demostraron cómo, si la función analizada es monótona dentro del rango de valores de cada variable de entrada, el método produce una mejor estimación, tanto de la media como de la función de distribución, que la obtenida a partir del muestreo aleatorio simple o el muestreo estratificado.

A continuación se describe brevemente el algoritmo utilizado:

- se le asigna a cada variable sujeta a incertidumbre una distribución de probabilidad. En este caso, debido a que no se tiene un conocimiento detallado de la distribución de probabilidad (D_1, D_2, \dots, D_k), se adoptará una distribución gaussiana para cada variable. Asimismo, se consideran todas las variables aleatorias independientes entre sí.
- cada función de densidad de probabilidad se divide en N intervalos equiprobables y no superpuestos. Sobre cada tramo se toma de forma aleatoria un valor, de tal manera que se obtiene una muestra de N valores para cada variable de entrada (k): X_{ij} ($i=1..N, j=1..k$)
- finalmente, la composición del conjunto de valores de las variables de entrada correspondiente a cada simulación se realiza mediante la asociación aleatoria de las N componentes de cada vector. Esto equivale a realizar una ordenación aleatoria de las columnas de la matriz X_{ij} . Así pues, las filas de la matriz resultante, \tilde{X}_{ij} , contienen los valores de las variables de entrada de las N simulaciones que componen la muestra.

La determinación del tamaño de la muestra (N) es un aspecto importante cuando se aplica un método Montecarlo. No existe una expresión matemática para determinar *a priori* el número de simulaciones que asegura un cierto nivel de error, ya que la variabilidad de los estimadores estadísticos depende de la función de distribución de los resultados numéricos que, en principio, es desconocida. Sin embargo, algunos análisis teóricos, utilizados en algunos trabajos anteriores (Lomas y Eppel 1992, Fürbringer y Roulet 1995), se pueden aplicar para realizar una estimación del tamaño de muestreo. Si se asume que los resultados se ajustan a una distribución normal y se aplica un método de muestreo aleatorio, se puede demostrar de forma teórica que a partir de un tamaño de muestra de 100 elementos se obtiene una menor reducción en los intervalos de confianza de las

estimaciones de la media (Ec. 1) y la desviación típica (Ec. 2). En la figura 6.1 se muestra la evolución de dichos intervalos de confianza al aumentar el tamaño de la muestra aleatoria. Además, si la función es monótona, de acuerdo con los mencionados resultados de McKay et al (2000), el método LHS produce una estimación sujeta a una menor variabilidad de la medida, varianza y función de densidad de probabilidad. Por tanto, se ha tomado un tamaño de muestra de 100 elementos para los análisis presentados.

$$-\frac{t_{1-\gamma/2}[N-1]}{\sqrt{N}} \leq \frac{\mu - m(y_i)}{s(y_i)} \leq \frac{t_{1-\gamma/2}[N-1]}{\sqrt{N}} \quad \text{Ec. 1}$$

$$\frac{N-1}{\chi^2_{\gamma/2}[N-1]} \leq \frac{\sigma^2}{s(y_i)^2} \leq \frac{N-1}{\chi^2_{1-\gamma/2}[N-1]} \quad \text{Ec. 2}$$

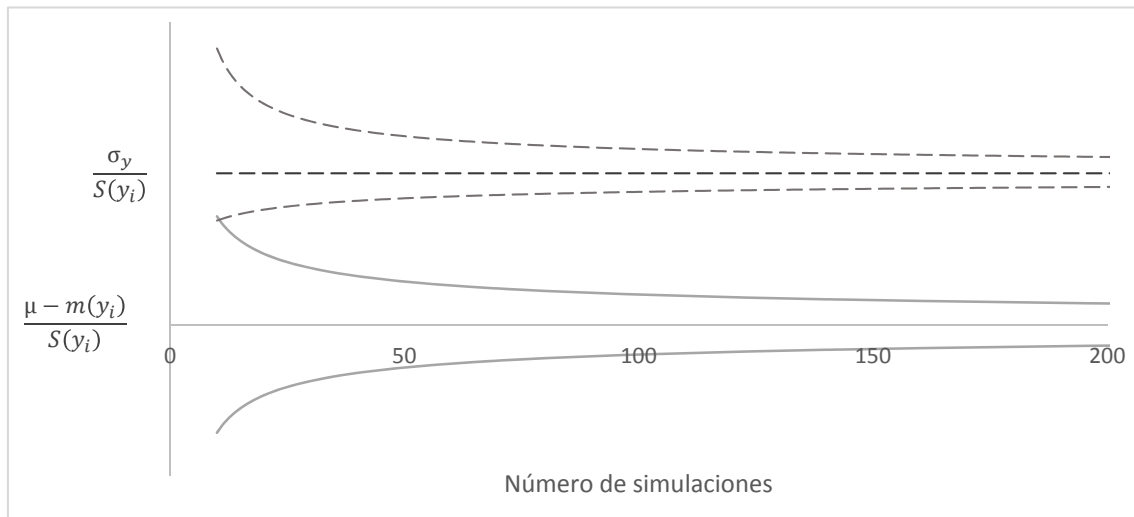


Fig. 6.1. Intervalo de confianza para la estimación de la desviación típica y la media según el tamaño -número de simulaciones- de la muestra aleatoria.

6.3. Caso de estudio

Los cubículos experimentales tomados para el caso de estudio corresponden a los contruidos por el grupo de investigación GREa en Puigverd (Lleida) (Fig. 6.2). Están concebidos para el análisis experimental de distintas soluciones constructivas: por ejemplo muros de hormigón con PCM microencapsulado (Cabeza et al. 2007). Las dimensiones de las celdas experimentales son 2,4x2,4x2,4m. En este capítulo se tomará la solución constructiva descrita en el trabajo de Castell et al. (2010). En ella el PCM se integra, por medio de las placas CSM de Rubitherm, en un cerramiento de doble hoja de ladrillo (fig. 6.2). Por otro lado, las propiedades térmicas de los materiales se han tomado de la base de datos del código técnico de la edificación (CTE). En los casos de simulación planteados, se considerará la inclusión de una capa de 1 o 2cm de PCM.

Adicionalmente, se han considerado las siguientes especificaciones para el funcionamiento de los cubículos experimentales:

- se fija una temperatura de consigna constante de 24°C para todo el periodo anual
- a partir de esta temperatura del aire interior se calcula el consumo anual en calefacción y refrigeración
- se asume una infiltración constante de 0,12 ACH. No se considera una ventilación mecánica adicional
- no existen cargas internas, ocupación ni masa térmica en la zona interior
- los datos climáticos se toman de la base de datos de EnergyPlus para la ciudad de Lleida

Carreras et al. (2015) utilizaron unas condiciones de operación similares en su estudio sobre la optimización multi-objetivo del espesor de aislante.

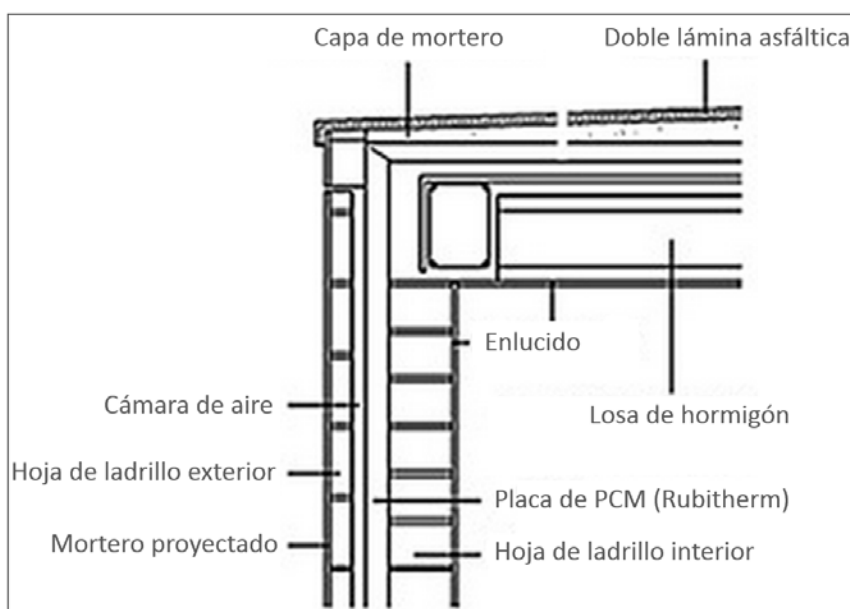


Fig. 6. 2. Esquema constructivo del cubículo experimental (Castell et al. 2010).

6.3.1. Propiedades termofísicas del PCM

En el estudio, se toma la sustancia denominada RT27 del fabricante Rubitherm, como PCM de referencia. Las curvas entalpía temperatura -correspondientes a la fusión y solidificación- se midieron mediante el método T-history (Zhang et al. 1999, Marín et al. 2003) y se muestran en la figura 6.3. Estos resultados se han presentado (Lázaro et al. 2006) y utilizado (Dolado et al. 2011) en trabajos previos realizados en la Universidad de Zaragoza. La conductividad térmica, recogida en la tabla 6.2, fue medida por el fabricante de equipos de medida Netzsch Company mediante el método LFA (*Laser Flash Analysis*, modelo 457 MicroFlashTM). La densidad del material se determinó a partir de la medida del peso y volumen de la sustancia.

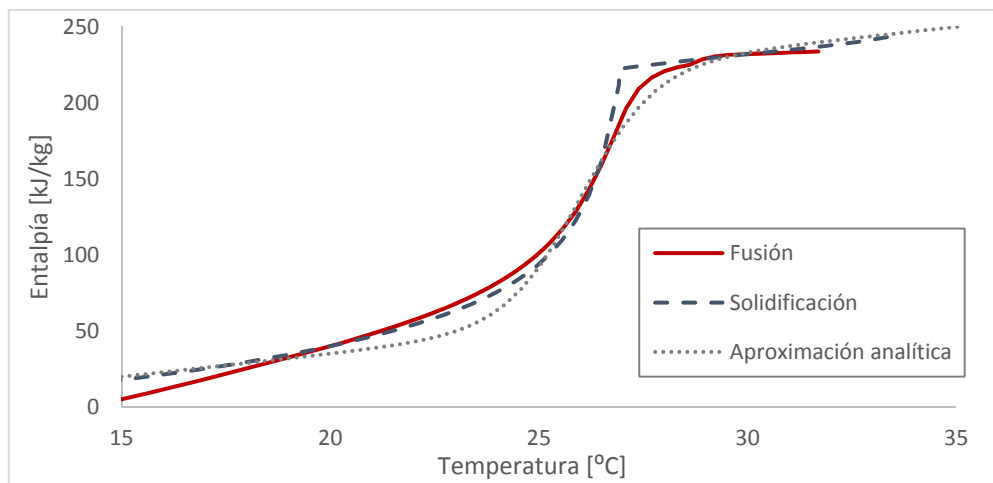


Fig. 6. 3. Representación de las curvas entalpía-temperatura (fusión y solidificación) medidas mediante el método T-history (Universidad de Zaragoza, Lázaro et al. 2006).

	Valor medido	Rango de temperatura*	Metodología	Incertidumbre	Referencias
h_m	170 kJ/kg (**)	15-35°C	T-history, DSC	±10%	Lázaro et al. (2006),
T_m	26 °C (**)	15-35°C	T-history, DSC	±1°C	Günther et al. (2009)
ΔT_m	0,9 °C (**)	15-35°C	T-history, DSC	±0,2°C	
c_p	3 kJ/(kg·K) (**)	15-35°C	DSC	±5%	Rudtsch et al. 2002
λ	0,16 W/(m·K)(***)	15-35°C	LFA+DSC+Densímetro+TMA	±10%	Coquard et al. (2009), Delgado et al. (2014)
ρ	752 kg/m ³	35°C	Densímetro+TMA	±2%	Peñalosa et al. (2014)

(*) Rango de temperatura en que se han realizado las medidas

(**) Parámetros de la curva analítica ajustada

(***) Valor promedio

Tabla 6. 2. Propiedades termofísicas del PCM y rango de incertidumbre asociado.

6.3.2. Incertidumbre en las propiedades del material

Se han seleccionado los niveles de incertidumbre asociados a cada variable según la exactitud tradicionalmente atribuida a cada uno de los métodos experimentales utilizados. La curva entalpía-temperatura se ha aproximado a partir de una expresión analítica (Eq. 3). De esta manera, es posible, de una manera sencilla, estudiar la influencia de distintas contribuciones, que constituyen la serie de parámetros que caracterizan la función matemática. Un enfoque idéntico se utilizó en el trabajo previo, realizado en la Universidad de Zaragoza, de Dolado et al. (2012). En la siguiente ecuación (Ec. 3) se muestra la función sigmoideal utilizada. Sobre ella que se pueden identificar los mencionados parámetros que se corresponden con distintas propiedades mensurables: calor específico (c_p), entalpía (h_m) y temperatura de cambio de fase (T_m) y rango de temperaturas en el que tiene lugar dicho proceso (ΔT_m). Asimismo, en la figura 6.4 se muestra una representación gráfica de la curva.

$$h(T) = h_0 + c_p \cdot (T - T_0) + \frac{h_m}{1 + e^{-\frac{T - T_m}{\Delta T_m}}} \quad \text{Ec. 3}$$

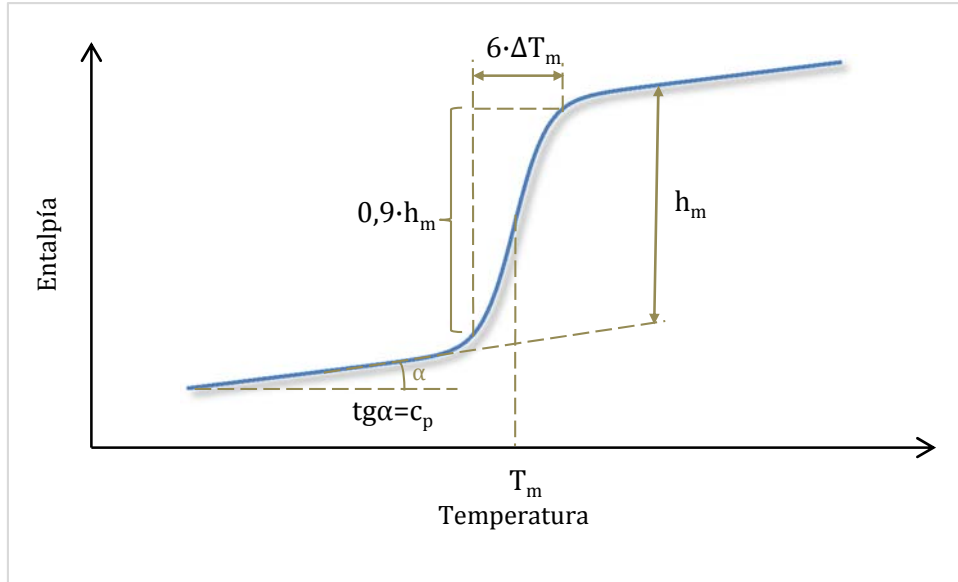


Fig. 6. 4. Representación gráfica de la función analítica utilizada y de los parámetros considerados.

En la tabla 6.2 se presentan, junto con el resto de propiedades termofísicas, los valores de los parámetros de la función obtenidos a partir de su ajuste a la curva medida del PCM RT27 (Rubitherm). Se acompañan del rango de incertidumbre asociado. Este intervalo ha sido determinado en base a los resultados de los trabajos previos dedicados a la determinación de la curva entalpía temperatura con las dos metodologías más habituales: T-history (Lázaro et al. 2006, Günther et al. 2009) y DSC (Rudtsch et al. 2002, Günther et al. 2009).

Por otro lado, considerando la medida de la conductividad térmica, la aplicación de la metodología LFA a este caso concreto, presenta la dificultad de su realización sobre la muestra en estado líquido. De acuerdo con los resultados presentados en los trabajos de Coquard et al. (2009) y Delgado et al. (2014), se ha asignado una incertidumbre de $\pm 10\%$ a esta magnitud. Dado que este valor de incertidumbre es superior a la variación de esta propiedad en el rango de temperaturas en el que oscila el material en esta aplicación, se ha tomado un valor constante con la temperatura. Se ha asignado un error del $\pm 2\%$ según los resultados de Peñalosa et al. (2014). Debido a que el modelo unidimensional utilizado para el cálculo de la transferencia de calor en el material no contempla la variación de la densidad con la temperatura, se ha tomado su valor más bajo, según se recomienda en el trabajo de Mehling et al. (2006) y en la asociación de la calidad RAL-PCM.

6.3.3. Simulación de los cubículos experimentales con PCM

Se ha utilizado el modelo de EnergyPlus para la simulación de los cubículos. Las principales características de la herramienta en relación con el cálculo de la transferencia de calor en elementos con PCM se detallan en el capítulo 1 (sección 1.6.2). Este capítulo sólo recoge los aspectos del trabajo, relacionados con la simulación del material, realizados de manera específica en la aplicación de la metodología descrita de análisis de propagación de incertidumbre.

6.3.3.1. Aproximación numérica de la curva entalpía-temperatura

EnergyPlus exige la introducción de esta curva a través de una tabla de datos (T_i, h_i) a partir de los cuales, mediante interpolación lineal (Pedersen 2007), realiza la aproximación numérica de la entalpía de cualquier temperatura comprendida en el rango definido por dicho conjunto de valores. Con el objetivo de minimizar los errores asociados a esta aproximación tanto en términos absolutos (resultados de una simulación concreta) como relativos (diferencia entre dos simulaciones), se ha definido una serie de puntos para la interpolación (T_i). Tal conjunto de temperaturas es el que minimiza el siguiente error cuadrático medio normalizado (NRMSD), propuesto por Tabares-Velasco (2012), entre la función analítica y la aproximación numérica (Ec. 4).

$$NRMSD = \frac{1}{h_m} \sqrt{\frac{\int_{T_1}^{T_{12}} (h(T) - \hat{h}(T, T_i))^2 \cdot dT}{(T_{12} - T_1)}} \quad Ec. 4$$

$$\theta_i = \frac{T_i - T_m}{\Delta T_m} \quad Ec. 5$$

Si se adimensionalizan estas temperaturas a partir de la ecuación 5 y se aplican a la interpolación de las curvas correspondientes a cada simulación, se puede demostrar matemáticamente que el error normalizado (NRMSD) debido a la aproximación numérica de la función es idéntico en todos los casos de cálculo planteados. En la siguiente figura 6.5 se muestran los puntos de interpolación calculados a partir de un procedimiento de optimización numérica del programa EES (Klein 2003). El error normalizado resultante de esta aproximación es de 0,004, un orden de magnitud menor que el recomendado por Tabares-Velasco (2012) (0,08).

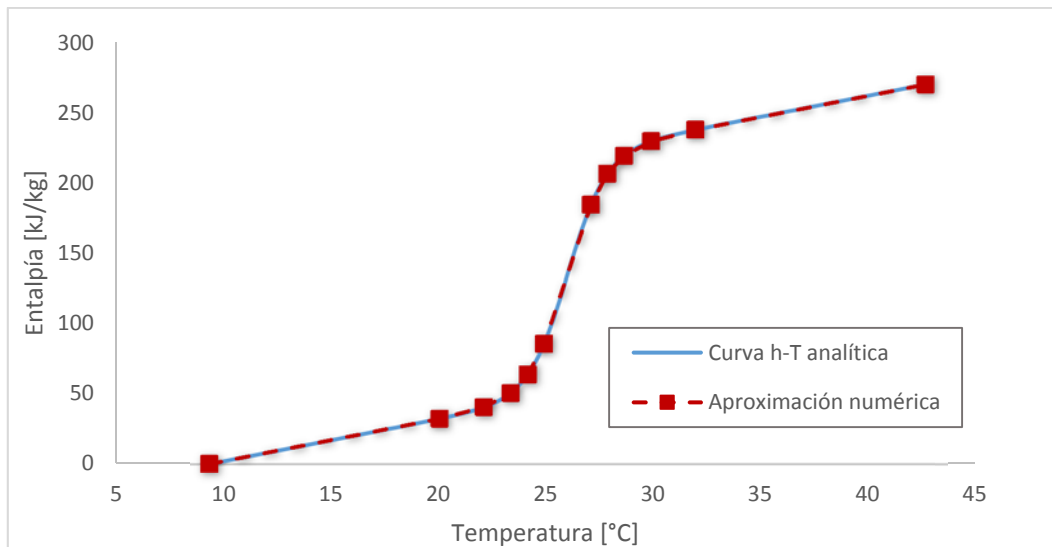


Fig. 6. 5. Representación conjunta de la curva h-T analítica y su aproximación numérica introducida en EnergyPlus.

6.3.3.2. Análisis de la influencia de la discretización numérica

Pese a que Tabares-Velasco et al. (2012) establecieron, a partir del análisis de un caso concreto, unas directrices para la selección del nivel de precisión en la discretización numérica utilizada para la simulación de los PCM, se realizó una evaluación previa de estos errores para la aplicación concreta presentada en este capítulo. El objetivo en esta sección es verificar que los errores atribuibles a la discretización numérica sean considerablemente menores a las desviaciones observadas entre los casos de simulación formulados a partir del muestro LHS.

Con este propósito, se analizó la influencia tanto de la resolución espacial y temporal (Δx , Δt) como del método de discretización temporal (implícito y Crank-Nicolson). A partir del conjunto de casos analizado se realizaron las siguientes observaciones:

- se confirmó para este caso que, si se utilizan resoluciones similares a las recomendadas por Tabares-Velasco et al. (2012), los errores en el consumo anual de energía son inapreciables
- si se incrementa la resolución espacial (obteniendo de esta manera mayores valores del número de Fourier asociado al mallado), el criterio de convergencia para la temperatura utilizado en el balance de energía superficial de los cerramientos debe ser reducido. De lo contrario el error en los resultados numéricos aumenta.
- la discretización Crank-Nicolson se comporta mejor: requiere un tiempo de cálculo similar al método implícito y, además, sus errores son más pequeños y menos sensibles al criterio de convergencia utilizado para la temperatura superficial de los cerramientos.

En la tabla 6.3 se muestra la influencia de la resolución numérica en los resultados obtenidos y el tiempo invertido en los cálculos. En este caso se presentan sólo los obtenidos a partir de la discretización Crank-Nicolson. Se ha seleccionado una resolución temporal y espacial, de 3 minutos y 5mm respectivamente. El error numérico estimado es menor a la centésima parte de la desviación típica del conjunto de simulaciones analizado en los siguientes apartados.

Δt [min]	Δx [mm]	Consumo anual de calefacción [kW·h]	$\epsilon_{\text{calefacción}}$ [%]	Consumo anual de refrigeración [kW·h]	$\epsilon_{\text{refrigeración}}$ [%]	Tiempo de computación [s]
3	6,67	2489,93	-0,0030%	232,72	-0,0142%	52
3	5	2489,97	-0,0016%	232,74	-0,0068%	54
3	3,33	2489,97	-0,0013%	232,75	-0,0008%	64
2	5	2489,96	-0,0016%	232,74	-0,0079%	80
2	4	2489,96	-0,0017%	232,74	-0,0074%	86
2	0,28	2489,98	-0,0011%	232,75	-0,0003%	100
1	0,14	2490,00	-	232,75	-	500

Tabla 6. 3. Análisis de la influencia de la discretización en los resultados numéricos (caso 2cm de PCM).

6.4. Resultados

6.4.1. Cálculo de la energía consumida en calefacción y refrigeración

En esta sección se presentan los resultados anuales del cálculo del consumo energético en calefacción y refrigeración. El consumo mensual de energía de dos casos –el primero sin PCM y otro con una lámina de 2cm del material- se compara en la figura 6.6. Asimismo la tabla 6.4 presenta los consumos y ahorros energéticos anuales de los tres casos analizados (sin PCM, lámina de 1cm de PCM y lámina de 2 cm de PCM). A partir de la comparación se ve cómo la mayor contribución al ahorro en el consumo de energía asociado a la inclusión del PCM en el cerramiento se produce durante el periodo estival. Es preciso señalar que esta reducción en el consumo en comparación con el caso de referencia establecido (sin PCM) se debe a dos factores: por un lado a la disminución de la transmitancia térmica del cerramiento asociada a la incorporación de la capa adicional de PCM y por el otro, al aumento de su capacidad térmica debido al cambio de fase.

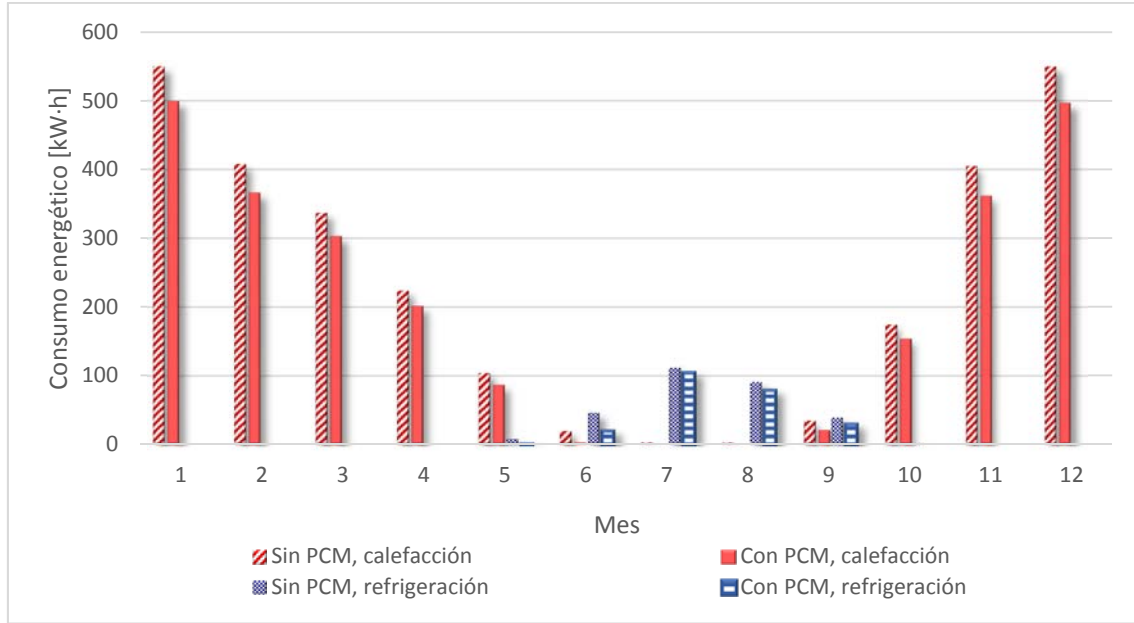


Fig. 6. 6. Consumo energético mensual de los cubículo: sin PCM y con 2cm de PCM.

Con el objetivo de discernir entre el efecto de tales contribuciones, se puede plantear una segunda comparación basada en el planteamiento de dos casos de referencia adicionales. En éstos, los cerramientos se definen de tal forma que se mantenga su transmitancia térmica constante con respecto a cada caso de estudio en el que se incluye PCM. La puesta en práctica de esta idea se traduce en la eliminación, con respecto al correspondiente modelo con PCM del almacenamiento latente de energía.

Los resultados de esta segunda comparación se muestran también en la tabla 6.4. Asimismo, en la figura 6.7 se presenta gráficamente el ahorro de energía mensual debido al efecto del cambio de fase. De manera complementaria, en la figura se solapa a esta representación la evolución de la temperatura promedio del PCM incluido en los cerramientos del cubículo (calculada a partir de la ecuación 6). Así, es posible identificar estos ahorros mensuales con los periodos en los que el PCM experimenta el proceso de cambio de fase.

$$h(\bar{T}_{PCM}) = \frac{\sum_{i=1}^{n_{PCM \text{ layers}}} \int_{x=0}^{x=e_{PCM}} A_i \cdot h(T) \cdot dx}{\sum_{i=1}^{n_{PCM \text{ layers}}} \int_{x=0}^{x=e_{PCM}} A_i \cdot dx} \quad Ec. 6$$

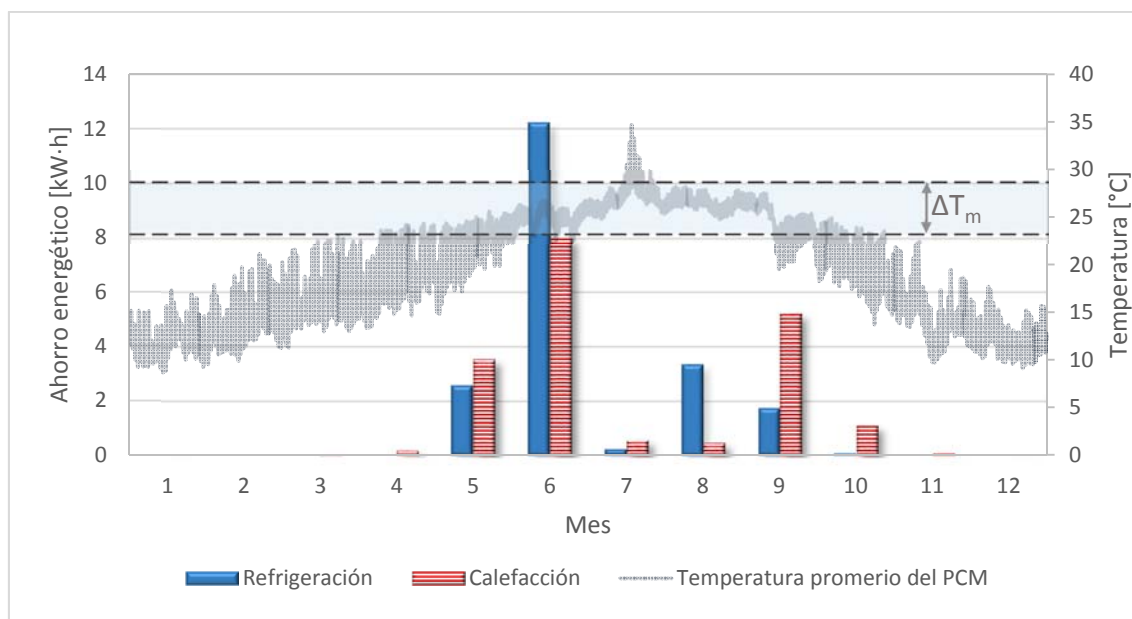


Fig. 6. 7. Representación conjunta del ahorro energético mensual debido al efecto del cambio de fase y de la temperatura promedio del PCM.

Casos	Calefacción			Refrigeración		
	Consumo energético [kW·h]	Ahorro [kW·h]	Ahorro (almacenamiento latente) [kW·h]	Consumo energético [kW·h]	Ahorro [kW·h]	Ahorro (almacenamiento latente) [kW·h]
Sin PCM	2806,1	-	-	294,7	-	-
1cm sin cambio de fase	2648,9	157,2 (5,6%)	-	272,2	22,5 (7,6%)	-
1cm PCM	2628	178,1 (6,3%)	20,9 (0,7%)	253,1	41,6 (14,1%)	19,1 (6,8%)
2cm sin cambio de fase	2508,6	297,5 (10,6%)	-	252,7	42 (14,3%)	-
2cm PCM	2489,8	316,3 (11,3%)	18,1 (0,7%)	232,7	62 (21%)	20 (6,5%)

Tabla 6. 4. Resumen del consumo y ahorro energético de los casos analizados.

Los resultados confirman el hecho que se apuntaba en la primera comparación. El almacenamiento latente no tiene apenas influencia relativa en el consumo de calefacción ya que durante los meses de invierno el material está lejos del cambio de fase, su contribución se limita al corto periodo de transición calefacción-refrigeración. En cambio, su influencia relativa en el consumo de refrigeración es mayor, en torno al 8%. La relación entre el ahorro en refrigeración debido a la reducción de la transmitancia térmica y el obtenido gracias al efecto del cambio de fase, varía entre el 1:1 –para el caso de 1 cm de PCM- y el 2:1 –cubículo con 2cm de PCM-. Estos resultados muestran, para este caso concreto, que se obtendría una reducción más efectiva del consumo energética mediante la mejora de las condiciones de aislamiento térmico que a partir de la incorporación de PCM a los cerramientos.

6.4.2. Evaluación de la incertidumbre en los resultados

Los resultados de las 100 simulaciones definidas por el método de muestreo LHS se han utilizado para evaluación de la incertidumbre asociada a la soluciones de los casos de estudio planteados. A partir de esta muestra de valores de la solución, es posible realizar una estimación de la media, desviación típica y de la función de densidad de probabilidad. A modo de ejemplo, en la figura 6.8 se muestra el histograma de frecuencia relativa de la energía consumida en refrigeración (caso con 2cm de PCM). A su vez, en la tabla 6.5 se recogen los resultados del análisis estadístico a los resultados. Adicionalmente, se ha aplicado el test de normalidad Shapiro-Wilk (Royston 1982) expandido.

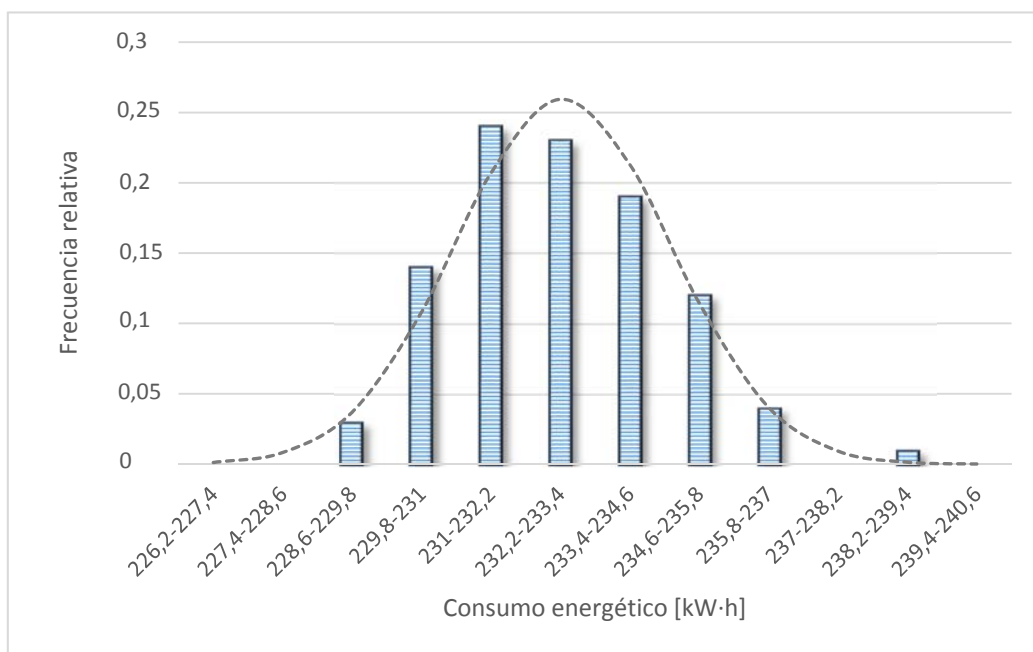


Fig. 6. 8. Histograma de frecuencias relativas del consumo energético de refrigeración (2cm PCM).

	1cm PCM		2cm PCM	
	Consumo refrigeración	Consumo calefacción	Consumo refrigeración	Consumo calefacción
Media [kW·h]	253,10	2628,01	232,70	2489,78
Desviación típica [kW·h]	1,94	6,56	1,81	11,22
W (test Shapiro-Wilk expandido, Royston 1982)	0,996	0,999	0,994	0,999
Incertidumbre [kW·h]	±4,35	±14,71	±4,06	±25,16
Ahorro energético [kW·h]	41,6 (±10,5%)	178,1 (±8,3%)	62,0 (±6,5%)	316,3 (±5,7%)

Tabla 6. 5. Resumen del análisis estadístico de los resultados.

Asumiendo la distribución normal de los resultados, se ha calculado el nivel de incertidumbre ($\pm\delta$) asociado a un nivel de confianza del 97,5%. Pese a que si se compara con el consumo global del cubículo, la incertidumbre asociada a la medida de las propiedades del PCM produce un error relativo pequeño -menor al 2%-, estas desviaciones son apreciables si se comparan con el ahorro logrado con la incorporación de este material en los cerramientos (entre el 6 y el 10%).

6.4.3. Análisis de sensibilidad: influencia de la incertidumbre de los parámetros de 6.4.3. entrada

Se ha realizado el análisis de sensibilidad, es decir de la influencia de la inexactitud de las medidas de las propiedades termofísicas sobre los resultados, a partir de los coeficientes normalizados de regresión (SRC, Standarized Regression Coefficient) (Saltelli 2004). Este método se basa en el ajuste a una función lineal por mínimos cuadrados de los resultados de la muestra obtenida en función de las variables de entrada sujetas a incertidumbres (Ec. 7).

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^6 \beta_i \cdot x_i \quad \text{Ec. 7}$$

A partir de este ajuste, los coeficientes que multiplican a cada variable se normalizan a partir de la desviación típica de la solución (σ_y) y de dicha variable (σ_i) (Ec. 8).

$$SRC_i = \frac{\beta_i \cdot \sigma_i}{\sigma_y} \quad \text{Ec. 8}$$

Este coeficiente (SRC) proporciona, de forma directa, una cuantificación de la influencia relativa del error asociado a cada variable de entrada sobre el global de los resultados del modelo numérico. De esta forma, las variables de gran relevancia en el modelo pero a las que se les atribuye un error pequeño, les corresponderá un valor de SRC bajo. Por otro lado, los valores positivos de este indicador, señalan que un incremento en la variable de entrada observada implica un aumento del valor del resultado analizado.

Este análisis presenta la principal ventaja de poder aplicarse directamente a la muestra obtenida sobre el método Montecarlo utilizado. Sin embargo, su rango de validez está condicionado por la adecuación de los resultados a la función lineal. Saltelli (2004) sitúa el límite de este ajuste en un coeficiente de regresión mínimo (Ec. 9) de 0,7.

$$R_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{Ec. 9}$$

En la figura 6.9, se muestran los SRC de cada variable de entrada correspondiente a los distintos consumos –calefacción y refrigeración- calculados para cada caso de estudio (1cm y 2cm de PCM incluido en los cerramientos). En todos ellos se obtiene un buen ajuste a la aproximación lineal ($R^2 > 0,9$). En el consumo de refrigeración, donde el proceso de cambio de fase tiene mayor relevancia, la incertidumbre de la temperatura de cambio de fase adquiere el mayor peso en el error global. Por otro lado, durante los periodos donde el PCM no experimenta el proceso de cambio de fase, el error en la medida de la conductividad térmica es el más relevante. Este efecto es mayor en la configuración que incorpora una capa de 2cm de PCM a los cerramientos del cubículo, ya que la resistencia térmica asociada al material tiene en este caso más importancia relativa.

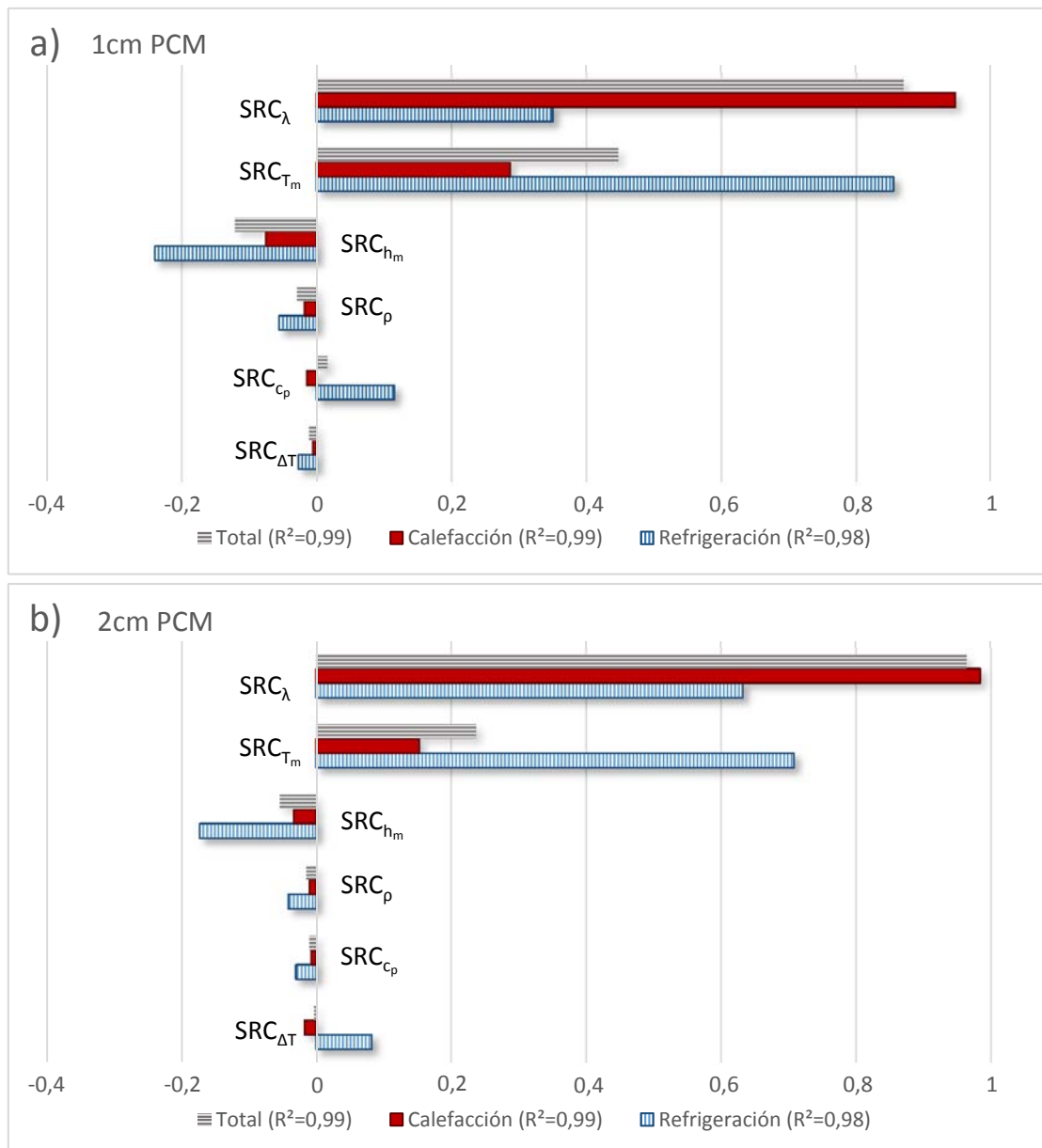


Fig. 6. 9. Análisis de sensibilidad (SRC) en los dos casos de estudio planteados: (a) 1cm PCM; (b) 2cm PCM.

El análisis mediante los SRC proporciona además información acerca de la tendencia de los resultados con la variación de las variables de entrada dentro de su rango de incertidumbre. En este caso de estudio simplificado, es esperable que el consumo de energía sea una función monótona decreciente con las variables relacionadas con la masa térmica de cerramiento –es decir, densidad, calor específico y entalpía de cambio de fase- y monótona creciente con respecto a la conductividad térmica. Sin embargo, en lo que atañe a la temperatura de cambio de fase existe, como ha señalado Neeper (2000), un punto óptimo que minimiza dicho consumo. En los dos casos de estudio presentados, se han obtenido valores positivos de SRC asociados esta magnitud. Este hecho indica que la temperatura de cambio de fase, se sitúa por encima del valor óptimo.

Con el objetivo de analizar las relaciones de segundo orden de las variaciones calculadas de la solución del modelo, se ha propuesto un segundo ajuste incluyendo estos mencionados efectos. La siguiente ecuación 10 muestra el polinomio de ajuste propuesto.

$$y = \beta_0 + \sum \beta_i \cdot x_i + \sum \beta_{ij} \cdot x_i \cdot x_j \quad \text{Ec. 10}$$

De manera análoga a la definición de los SRC, se propone la siguiente normalización, basada en las desviaciones de las variables involucradas, de para los coeficientes relacionados con términos de segundo orden (Ec. 11):

$$SRC_{ij} = \frac{\beta_{ij} \cdot \sigma_i \cdot \sigma_j}{\sigma_y} \quad \text{Ec. 11}$$

En la siguiente figura (fig. 6.10), se muestra el conjunto de SRC ampliado calculado a partir de la regresión propuesta. En ella se ha omitido la representación de aquellos valores menores a 0,01. Como se observa, existen contribuciones cuadráticas significativas relacionadas con la temperatura de cambio de fase en el entorno definido por los intervalos de incertidumbre de las variables consideradas en el estudio.

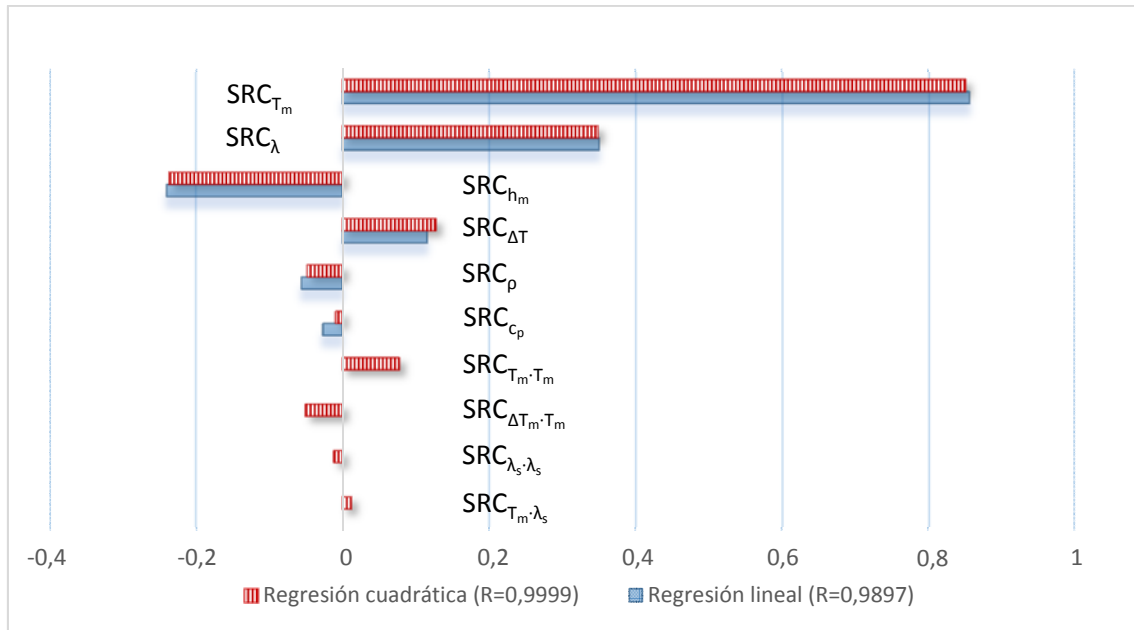


Fig. 6. 10. Conjunto de SRC ampliado (inclusión de los principales términos de segundo orden).

6.4.4. Propagación de incertidumbre y análisis de sensibilidad sobre un caso de estudio con la temperatura de cambio de fase óptima

En esta sección se analizan los resultados particulares del análisis propuesto en el entorno de un punto singular de caso de estudio presentado: aquel en el que la temperatura de cambio de fase del material minimiza el consumo de energía. El objetivo de este estudio es mostrar cómo las condiciones de diseño influyen en los resultados del análisis. Se cuantificará el efecto en el cálculo de energía empleada en refrigeración, periodo durante el cual la influencia del PCM es mayor.

En la siguiente figura (fig. 6.11) se muestra la relación entre la temperatura e intervalo térmico de cambio de fase y el consumo de energía en refrigeración. Estos resultados concuerdan con los presentados por Neeper (2000). Los menores consumos de energía se obtienen con materiales con un rango de temperaturas de cambio de fase estrecho. Sin embargo, el diseño es más robusto –la dependencia del consumo de energía con la temperatura de cambio de fase es más suave- si se utilizan PCM con un intervalo más amplio de temperaturas para dicho proceso. En el caso concreto que se plantea en este estudio ($\Delta T_m=0,9^{\circ}\text{C}$) la temperatura óptima de cambio de fase es $24,8^{\circ}\text{C}$.

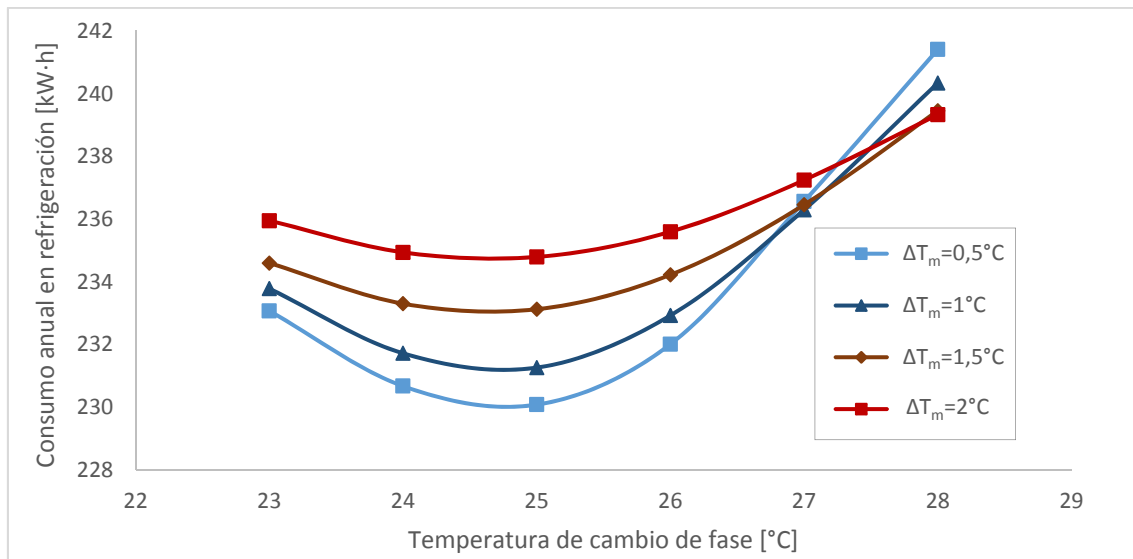


Fig. 6. 11. Influencia de la temperatura (e intervalo térmico) de cambio de fase en el consumo energético anual de refrigeración.

En la tabla 6.6 se resumen los resultados estadísticos obtenidos a partir de la propagación de incertidumbres en este caso particular. A su vez la figura 6.12 muestra el conjunto de SRC ampliado asociado al consumo de energía en refrigeración. Dado que el análisis se ha aplicado sobre un mínimo de la función, el SRC asociado con la variación lineal de consumo de energía con la temperatura de cambio de fase (SRC_{T_m}) es cercano a cero. En relación con el caso anteriormente estudiado, la incertidumbre en los resultados se reduce, debido a la presencia de este mínimo. Es necesario destacar que estos resultados se corresponden con una situación particular. Por ello, es aconsejable analizar este aspecto si se prevén relaciones no lineales entre las variables de entrada analizadas y los resultados numéricos.

	$T_m=24,8^{\circ}\text{C}$	$T_m=26^{\circ}\text{C}$ (sección 6.4.1)
Media [kW·h]	231,02	232,70
Desviación típica [kW·h]	1,28	1,81
W (test Shapiro-Wilk ampliado, Royston 1982)	0,999	0,994
Ahorro refrigeración [kW·h]	$63,68 \pm 2,87$	$62,0 \pm 4,06$

Tabla 6. 6. Comparación de la propagación de incertidumbres entre los casos original ($T_m=26^{\circ}$, 2cm PCM) y con la temperatura de cambio de fase óptima ($T_m=24,8^{\circ}$, 2cm PCM).

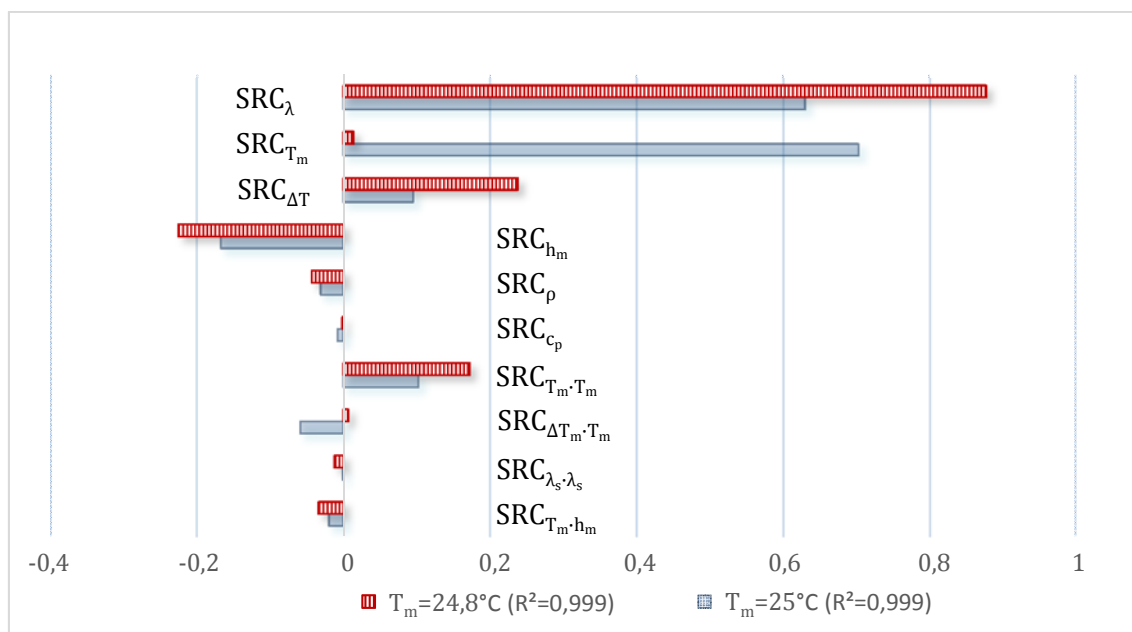


Fig. 6. 12. Comparación de los resultados del análisis de sensibilidad (SRC) para los casos original y con la temperatura de cambio de fase óptima (1cm PCM).

6.4.5. Reducción de la incertidumbre en los resultados a través de la mejora en la exactitud de las medidas

En las secciones anteriores se ha analizado la incertidumbre asociada a los resultados numéricos ocasionada por las posibles desviaciones en la medida de las propiedades del PCM. El error relativo de los cálculos del ahorro energético debido a la inclusión del material es significativo (tabla 6.7). Este error se puede traducir en desviaciones importantes en la evaluación de la inversión económica (p.ej. en el cálculo de periodo de retorno).

	Consumo energético de refrigeración [kW·h]	Ahorro energético en refrigeración [kW·h]	Incertidumbre
Sin PCM	294,7		
PCM 1cm	253,1	41,6±4,4	±10,5%
PCM 2cm	232,7	62,0±4,1	±6,5%
PCM 2cm (T_m optimizada)	231,0	63,7±2,9	±4,5%

Tabla 6. 7. Incertidumbre del consumo y ahorro anual de refrigeración en los casos analizados.

Teniendo en cuenta este hecho, se propone en esta sección un método para lograr reducir la incertidumbre de la solución numérica a través de la mejora de la exactitud de algunas propiedades.

En los casos presentados en este trabajo, donde la solución puede aproximarse a una función lineal en el entorno analizado y las variables aleatorias de entrada son

independientes y poseen una distribución gaussiana, la regresión lineal obtenida previamente (Ec. 7, sección 6.4.3) puede emplearse para estimar la propagación de errores si la desviación en las variables de entrada se reduce del valor original a $(\delta x_{i,0})$ hasta un nuevo nivel (δx_i) (Ec. 12).

$$\delta y = \delta y_0 \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^k SRC_i^2 \cdot \left(\frac{\delta x_i}{\delta x_{i,0}}\right)^2} \quad Ec. 12$$

Donde δy_0 es la incertidumbre de la solución calculada en el caso original.

La aproximación propuesta (Ec. 12) para la propagación de incertidumbres puede ser utilizada para determinar la combinación de incertidumbres de las variables de entrada (δx_i) que permite la reducción del error asociado a los resultados numéricos hasta un determinado nivel (δy_{req}) . En este caso, se propone la asignación de esta exactitud requerida para cada variable de entrada mediante un reparto inversamente proporcional a su correspondiente SRC, tal como se muestra en la ecuación 13.

$$\delta x_i = \left| \frac{\alpha}{SRC_i} \right| \cdot \delta x_{i,0} \quad Ec. 13$$

Donde α es el coeficiente de reparto. Es preciso señalar que el cociente $|\alpha/SRC_i|$ puede alcanzar un valor mayor que la unidad si la influencia en los resultados de la variable concreta es pequeña. Esta evaluación predice que sería posible, incluso, reducir la exactitud de la variable asociada. Sin embargo, no se considera, en este caso, práctica esta posibilidad. Además, la ampliación del error admisible en las variables de entrada puede empeorar el ajuste de la aproximación lineal sobre la que se basa este sencillo método propuesto. Así pues, en esta situación mencionada ($|\alpha/SRC_i| > 1$), se mantendrá la incertidumbre original.

De esta forma, se plantea un método iterativo para contemplar este último criterio, que se expresa de matemáticamente mediante la siguiente ecuación (Ec. 14):

$$\delta x_i^j = \min \left(\frac{\alpha^j}{SRC_i} \cdot \delta x_{i,0}, \delta x_{i,0} \right) \quad Ec. 14$$

Donde el subíndice j indica el número de la iteración y el coeficiente de reparto correspondiente a cada iteración, α^j , se calcula a partir de la ecuación 15.

$$\alpha^j = \sqrt{\frac{\left(\frac{\delta y}{\delta y_0}\right)^2 - \sum_{SRC_i |\alpha_i^{j-1}| \geq 1} SRC_i^2}{n^{j-1}}} \quad Ec.15$$

Donde n^{j-1} es el número de parámetros cuya incertidumbre debe ser reducida según el criterio definido por la ecuación (Ec. 16):

$$\frac{\alpha^{j-1}}{SRC_i} < 1 \quad \text{Ec. 16}$$

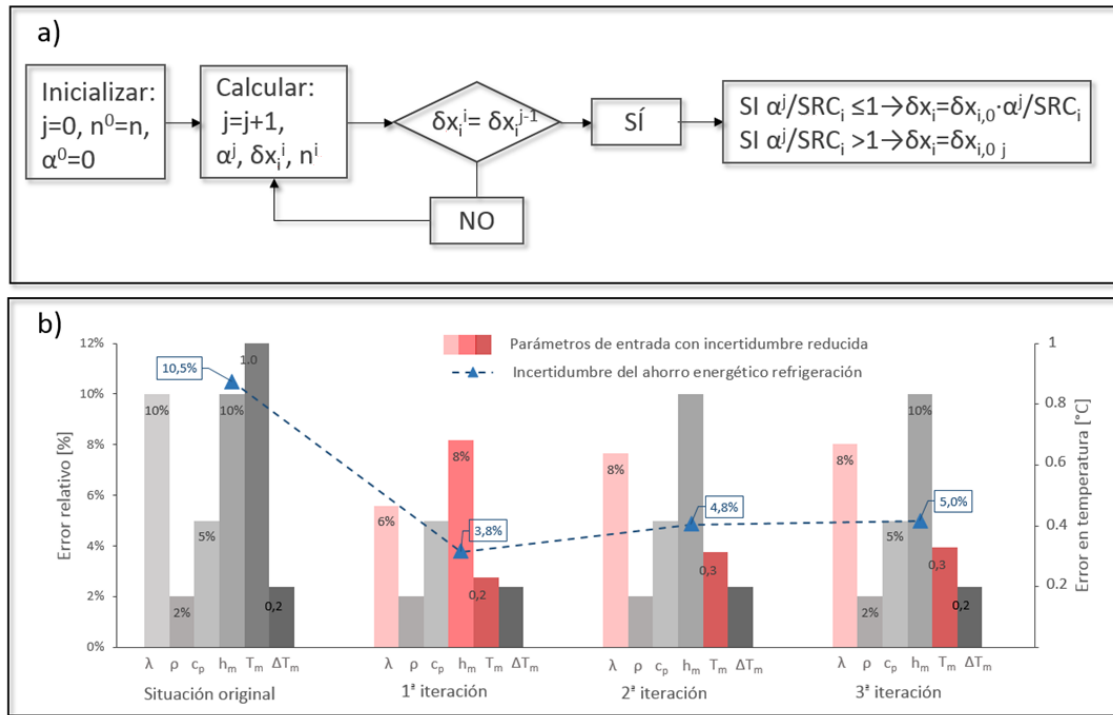


Fig. 6. 13 a) representación por medio de un diagrama de bloques del algoritmo propuesto; b) representación de los resultados del algoritmo (caso particular 1cm de PCM).

En la figura 6.13a se representa mediante un diagrama de bloques el método descrito. Se ha aplicado en este capítulo para reducir la incertidumbre relativa del consumo anual de energía en refrigeración del cubículo hasta un $\pm 5\%$. Los resultados se muestran en la tabla 6.8, mientras que en la figura 6.13b se representa gráficamente la evolución del proceso iterativo descrito para el caso particular del cerramiento con una capa de 1cm de PCM. Adicionalmente, se muestra en la tabla la incertidumbre esperada a partir de la tolerancia recomendada en los trabajos de (Mehling et al. 2006, Günther et al. 2009, Rathgeber et al. 2014) y la asociación RAL-PCM para la medida de las propiedades del PCM. Estos niveles de exactitud definidos producen un error en los resultados numéricos superior a $\pm 5\%$. En relación con estas recomendaciones recogidas publicaciones previas, en los casos particulares estudiados en este capítulo, la exactitud requerida para la temperatura de cambio de fase es más restrictiva, mientras se puede aceptar un intervalo de error en la medida de la conductividad más amplio.

	1cm PCM			2cm PCM		
	Incertidumbre caso original	Tolerancia definida en trabajos previos	Tolerancia requerida	Incertidumbre caso original	Tolerancia definida en trabajos previos	Tolerancia requerida
λ	$\pm 10\%$	$\pm 5\%^*$	$\pm 8\%$	$\pm 10\%$	$\pm 5\%^*$	$\pm 8,2\%$
ρ	$\pm 2\%$	$\pm 1\%^*$	$\pm 2\%$	$\pm 2\%$	$\pm 1\%^*$	$\pm 2\%$
c_p	$\pm 5\%$	$\pm 10\%^*$	$\pm 5\%$	$\pm 5\%$	$\pm 10\%^*$	$\pm 5\%$
T_m	$\pm 1^\circ\text{C}$	$\pm 1^\circ\text{C}^{**}$	$\pm 0,3^\circ\text{C}$	$\pm 1^\circ\text{C}$	$\pm 1^\circ\text{C}^{**}$	$\pm 0,7^\circ\text{C}$
ΔT_m	$\pm 0,2^\circ\text{C}$	$\pm 0,2^\circ\text{C}$	$\pm 0,2^\circ\text{C}$	$\pm 0,2^\circ\text{C}$	$\pm 0,2^\circ\text{C}$	$\pm 0,2^\circ\text{C}$
h_m	$\pm 10\%$	$\pm 10\%^{***}$	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$	$\pm 10\%^{***}$	$\pm 10\%$
Ahorro refrigeración	$\pm 10,5\%$	$\pm 9,4\%$	$\pm 5\%$	$\pm 6,5\%$	$\pm 5,4\%$	$\pm 5,0\%$

(*) Asociación RAL-PCM; (**) Günther et al. 2009, Rathgeber et al. 2014; (***) Mehling et al. (2006), Günther et al. (2009), Rathgeber et al. (2014)

Tabla 6. 8. Incertidumbre requerida para la medida de las propiedades termofísicas del PCM.

6.6. Conclusiones del capítulo

En este capítulo se ha presentado un ejemplo de la aplicación del análisis de sensibilidad y de propagación de incertidumbre al estudio del efecto de los errores asociados a la medida de las propiedades termofísicas del PCM en los resultados de un modelo numérico. En este caso, se ha tomado un caso sencillo, en el que el PCM está integrado en los cerramientos y contribuye de forma pasiva a la reducción del consumo energético gracias al aumento de la inercia térmica de los mismos. No son frecuentes los estudios numéricos dentro del ámbito de investigación relacionado con el almacenamiento térmico con PCM en los que se tenga en cuenta la propagación de incertidumbres. Además, sólo en los trabajos de Dolado et al. (2012) y Guichard et al. (2014) se ha aplicado un método de análisis global para el estudio, respectivamente, de un intercambiador PCM-aire y un cubículo experimental. En este caso se ha utilizado una metodología basada en el análisis Montecarlo y en la obtención de los coeficientes normalizados de regresión (SRC). Estos métodos se utilizan frecuentemente en el ámbito de la simulación energética de edificios (p. ej. Domínguez-Muñoz et al. 2010, Hopfe y Hensen 2011, Calleja Rodríguez et al. 2013).

Si se tienen en cuenta los niveles de incertidumbre correspondientes a los distintos métodos utilizados para la determinación de las propiedades del PCM, se obtiene, en el caso de estudio planteado, un error significativo en la estimación del ahorro energético (en torno al 10%). Contribuyen de manera más relevante a esta desviación los errores en la determinación de la temperatura de cambio de fase y la conductividad térmica (enumeradas por orden de importancia). En cambio, la desviación asociada a la medida de la entalpía de cambio de fase tiene una menor influencia, mientras que la correspondiente a la densidad y calor específico resulta irrelevante.

Además, se ha estudiado la modificación de los resultados del análisis al ser aplicados al caso singular en el que la temperatura de cambio de fase minimiza el consumo energético en refrigeración. En relación a la primera situación estudiada, la presencia del óptimo de la función reduce el nivel de incertidumbre ya que la contribución del error de la temperatura de cambio de fase se limita a los términos de segundo orden (si ésta se analiza desde el punto de vista de su desarrollo en polinomio de Taylor). Es preciso señalar que

estos resultados no son generalizables y, en consecuencia, conviene tener en cuenta la posible presencia de efectos no lineales en el modelo analizado.

Por último, se ha propuesto un método sencillo para calcular un reparto de las mejoras necesarias en la exactitud de las medidas que permite alcanzar una determinada tolerancia en los resultados numéricos. A causa de su simplicidad, el método sólo se puede aplicar en aquellas situaciones en las que el modelo se ajuste razonablemente a la aproximación lineal en el entorno analizado y la incertidumbre de las variables de entrada se asemeje a una distribución gaussiana. En el caso de estudio presentado, que cumple ambas restricciones, se ha calculado que la exactitud necesaria en la medida de la temperatura de cambio de fase y la conductividad térmica es, respectivamente, de $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ y $\pm 8\%$. Si se compara con los niveles de tolerancia aconsejados en trabajos previos (Mehling et al. 2006, Günther et al. 2009, Rathgeber et al. 2014) y la asociación RAL-PCM, el calculado para dicha temperatura es más restrictivo en estos casos estudiados.

Conviene subrayar el carácter particular de los niveles de tolerancia calculados, ya que dependen directamente de la sensibilidad del modelo frente a la variación de los parámetros de entrada. Por tanto, la aplicación de un procedimiento que permita la cuantificación de estos errores admisibles puede ser una útil herramienta para la selección, en cada aplicación concreta, de la metodología de medida más adecuada para la determinación de las propiedades termofísicas del PCM.

Capítulo 7. Simulación numérica del funcionamiento del sistema de suelo radiante con PCM

7.1. Introducción

En este capítulo se aborda la simulación numérica del funcionamiento del sistema de suelo radiante propuesto en la tesis (vid. Capítulo 2) cuando opera en una instalación de ensayos. Dos son los principales objetivos que han motivado el estudio. En primer lugar, conocer el comportamiento del elemento termoactivo, así como predecir qué influencia tienen sobre esta respuesta los principales parámetros de diseño y algunas condiciones de contorno. En segundo lugar, los resultados del estudio y el conocimiento adquirido han permitido la obtención del diseño y dimensionamiento definitivo de la mencionada instalación experimental.

El trabajo se enmarca dentro del proyecto de investigación SOLTES llevado a cabo en colaboración por la Universidad de Zaragoza y la empresa CIAT. En dicho contexto, uno de los objetivos era el desarrollo de una instalación experimental para el estudio de distintos equipos térmicos. En ella se proponía la integración del almacenamiento térmico en distintos niveles del sistema energético completo. Así pues, en lo que atañe a la incorporación del PCM en los materiales de construcción, se propuso el análisis experimental del comportamiento de dos cubículos idénticos (descritos en el apartado 7.2.1) en los que se montaban, respectivamente, un sistema de suelo radiante convencional y el desarrollado en esta tesis. En la figura 7.1 se muestra el suelo radiante con PCM finalmente instalado. Por otro lado, el interés del análisis se centró en la aplicación en la que dicho componente activo se acopla a una bomba de calor aire-agua. En este caso, el almacenamiento térmico se usa para lograr un ahorro económico en el coste del consumo de energía eléctrica a través del traslado de la operación de la máquina al periodo de demanda valle de dicho recurso.



Fig. 7. 1. Imagen del suelo radiante con PCM granulado montado en la instalación experimental desarrollada (Montilla, Córdoba) en el contexto del proyecto SOLTES. a) Distribución de los tubos de agua; b) recredido, en fresco, realizado con el compuesto de mortero y suelo radiante.

En la metodología aplicada a este análisis confluyen distintas partes del trabajo de la tesis que se recapitulan a continuación. Primeramente, se ha partido del pre-diseño para el suelo radiante (sistema convencional con PCM granulado incorporado en el mortero) seleccionado en el capítulo 2 a partir de las conclusiones extraídas de la revisión del estado del arte. Por otra parte, y de una forma general, el estudio se enfoca a través de la simulación numérica conjunta del suelo radiante con el resto del cubículo, tal como se recomienda en el capítulo 1. De esta forma, ha sido necesaria la utilización de los modelos desarrollados en el capítulo 5. Asimismo, las propiedades termofísicas de las distintas formulaciones del material compuesto de mortero y PCM, determinadas en los capítulos 3 y 4, constituyen una información fundamental para la evaluación numérica. Finalmente, mediante la aplicación particular de la metodología para el análisis de sensibilidad y propagación de incertidumbres, como se propone en el capítulo 6, se ha podido realizar, por un lado, una cuantificación de la precisión de los resultados numéricos y, por otro lado, un análisis crítico acerca de la adecuación, para el estudio de esta aplicación concreta, de la exactitud de los métodos experimentales utilizados en la tesis para la determinación de las propiedades termofísicas.

7.2. Descripción del caso de estudio

7.2.1. Instalación experimental

En la siguiente figura (fig. 7.2) se representa el cubículo experimental en el que se instala el suelo radiante. En él la ventana, orientada hacia el norte, está compuesta por un acristalamiento simple. El modelo no tiene en cuenta la transmisión del calor a través del marco. A su vez, la tabla 7.1 recoge las propiedades termofísicas de los materiales que componen sus cerramientos. Los valores de estas propiedades han sido extraídos de la base de datos del Código Técnico de la Edificación (CTE). Se consideran las propiedades relativas a la radiación idénticas en todas las superficies (interiores y exteriores) ($\epsilon_{SW}=0,6$, $\epsilon_{LW}=0,9$). La instalación experimental no cuenta con un sistema de ventilación, de modo que se ha estimado una tasa horaria de renovación de aire (ACH) constante de $0,1h^{-1}$ asociada a los fenómenos de infiltración. El sistema de suelo radiante en el cubículo experimental descrito se acopla a una bomba de calor aire-agua.

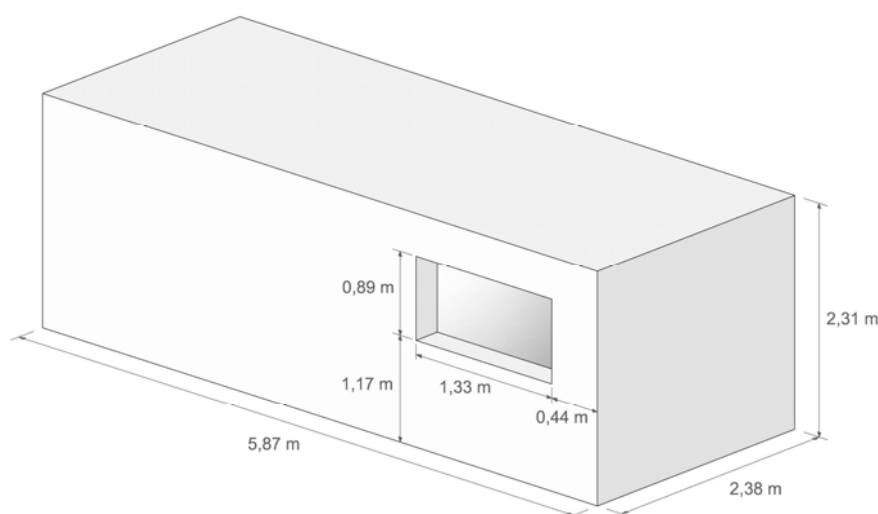


Fig. 7. 2. Representación del cubículo experimental analizado.

Paredes	Espesor [mm]	λ [W/(m·K)]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/(kg·K)]
Panel sandwich (PU)	50	0,025	50	1500
Tejado	Espesor [mm]	λ [W/(m·K)]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/(kg·K)]
Panel sándwich (lana mineral)	80	0,03	120	900
Suelo	Espesor [mm]	λ [W/(m·K)]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/(kg·K)]
Panel de poliestireno expandido (EPS)	40	0,0184	40	1760
Mortero + PCM (*)	50	$\lambda_{m-PCM}(X_{PCM})$	$\rho_{m-PCM}(X_{PCM})$	$c_{p,m-PCM}(X_{PCM})$
Baldosa de gres	10	2,3	2500	1000

Tabla 7. 1. Propiedades termofísicas de los materiales analizados (CTE). (*) Las propiedades del material compuesto de mortero y PCM se calculan mediante los modelos ajustados en el capítulo 3.

7.2.2. Geometría del suelo radiante

Los conductos de agua (16mm de diámetro exterior) están embebidos en una placa de mortero de 50mm a una profundidad de 40mm. Se ha considerado en el caso de referencia una separación uniforme entre tubos contiguos de 120mm. Conviene señalar que esta distancia es inferior al límite máximo recomendado en el capítulo 5 (sección 5.3.4.2) para la utilización del modelo unidimensional de suelo radiante con PCM. Por otro lado, el espesor de la capa de mortero colocada sobre los conductos cumple con el requerimiento mínimo fijado por la norma EN 1264-4 (2010) (30mm). No obstante, las normas NF DTU 65.14 (2006) y DIN18560-2 (2009), dependiendo de las características mecánicas del material aislante colocado bajo la placa (en el caso de la primera) o de la resistencia a la flexión del material (en la segunda), establecen mayores exigencias, tal y como se recoge la tabla 7.2. Desde este punto de vista, la determinación de la resistencia mecánica del mortero con PCM, que se plantea como trabajo futuro, debe aportar la información necesaria para ajustar el espesor de la capa de recrecio a los requerimientos de estas normas europeas.

Norma	Espesor de la capa de recrecio sobre los tubos para sistemas tipo A (según la clasificación de la norma EN 1264)
EN 1264-4	>30mm o tres veces el tamaño máximo de los agregados
NF DTU 65.14	-Aislamiento SC1 (NF P61-2203): ≥35mm -Aislamiento SC2 (NF P61-2203): ≥40mm
DIN 18560-2	-Resistencia a flexión del mortero 5N/mm ² (F5, EN 13813) : ≥40mm -Resistencia a flexión del mortero 4N/mm ² (F4, EN 13813): ≥45mm

Tabla 7. 2. Espesores exigidos para la placa de recrecio sobre los tubos de suelo radiante según distintas normas vigentes en Europa (EN 1264-4, NF DTU 65.14, DIN 18560).

7.2.3. Propiedades del material compuesto de mortero y PCM

En las simulaciones se han utilizado los valores de las propiedades determinados en los capítulos 3 y 4. En la tabla 7.3, se muestran las expresiones obtenidas, a partir del ajuste de las medidas o mediante la predicción teórica, para la descripción de la variación de las estas propiedades con respecto al porcentaje másico del material granulado con PCM en el compuesto.

Propiedad	Dependencia con la cantidad de PCM
ρ_{m-PCM} [kg/m ³]	$1 / \left[\frac{x_{PCM}}{970} + \frac{(1 - x_{PCM})}{1960} \right]$
λ_{m-PCM} [W/(m·K)]	$1,32 \cdot \left[\frac{2,87 - 2,18 \cdot \phi_{PCM}}{2,87 + 1,09 \cdot \phi_{PCM}} \right]$
$h_{m-PCM}(T)$ [kJ/kg]	$(1 - x_{PCM}) \cdot 970 \cdot (T - T_0) + x_{PCM} \cdot [h_{GRI}(T) - h_{GRI}(T_0)]$

Tabla 7. 3. Expresiones correspondientes al ajuste de las medidas experimentales (ρ_{m-PCM} , λ_{m-PCM}) y a la predicción teórica (h_{m-PCM}) utilizadas para describir la variación de las propiedades del material compuesto con el contenido en PCM granulado.

La curva h-T de los materiales granulados, $h_{GRI}(T)$, se ha integrado en el modelo a través del ajuste de una expresión analítica a las medidas experimentales (vid. Capítulo 3, sección 3.4.3). En este caso, se propone la siguiente ecuación basada en la combinación lineal de tres funciones error de Gauss (Ec. 1). Dos son los objetivos de este tratamiento aplicado a los datos experimentales: por una parte, éste evita el tiempo adicional de cálculo asociado a la interpolación de los datos experimentales, que en el programa EES ralentiza notablemente la resolución del sistema de ecuaciones, y, por otra parte, facilita, a través de la realización de transformaciones sencillas en las expresiones analíticas, la descripción de las incertidumbres asociadas a la curva h-T (vid. Sección 7.5.2.1). Así pues, el ajuste de los parámetros ($c_{p,s}$, $c_{p,l}$, $h_{m,i}$, $T_{m,i}$ y $\Delta T_{m,i}$) se ha realizado por medio de la minimización del error cuadrático entre la expresión analítica y las medidas experimentales. Esta optimización se ha llevado a cabo de forma numérica en el programa EES (Klein 2003).

$$h_{GRI}(T) \begin{cases} h_{GRI}(T_0) + c_{p,s} \cdot (T - T_0) + \sum_{i=1}^3 \frac{h_{m,i}}{2} \cdot \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{T - T_{m,i}}{\Delta T_{m,i}} \right) \right] & T \leq T_{m,2} \\ h_{GRI}(T_0) + c_{p,l} \cdot (T - T_{m,2}) + c_{p,s} \cdot (T_{m,2} - T_0) + \sum_{i=1}^3 \frac{h_{m,i}}{2} \cdot \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{T - T_{m,i}}{\Delta T_{m,i}} \right) \right] & T > T_{m,2} \end{cases} \quad Ec. 1$$

Debido a que en los materiales analizados no se ha observado un fenómeno de histéresis significativo ($<0,3^{\circ}\text{C}$), se utiliza una única curva h - T extraída que se adapta simultáneamente a los datos de sendas curvas de solidificación y fusión. A modo de ejemplo, se muestra en la figura 7.3 el ajuste correspondiente al material GR27. La expresión analítica propuesta permite alcanzar una buena aproximación a la forma de las curvas h - T medidas (NMRSD=MRSD/ $\Delta h < 0,5\%$). En los casos en los que se ajusta esta única función analítica a los datos experimentales correspondientes a las curvas obtenidas en los ensayos de fusión y solidificación, el error es ligeramente superior (NMRSD $<1,5\%$). Esta desviación es considerablemente menor al límite superior establecido por Tabares-Velasco (2012) (NMRSD $<8\%$), que, debido a que se obtuvo para la simulación del PCM en una aplicación pasiva en un caso concreto, sólo conviene considerar como referencia orientativa. En la tabla 7.4 se recogen los parámetros de las respectivas curvas analíticas obtenidas mediante el ajuste descrito.

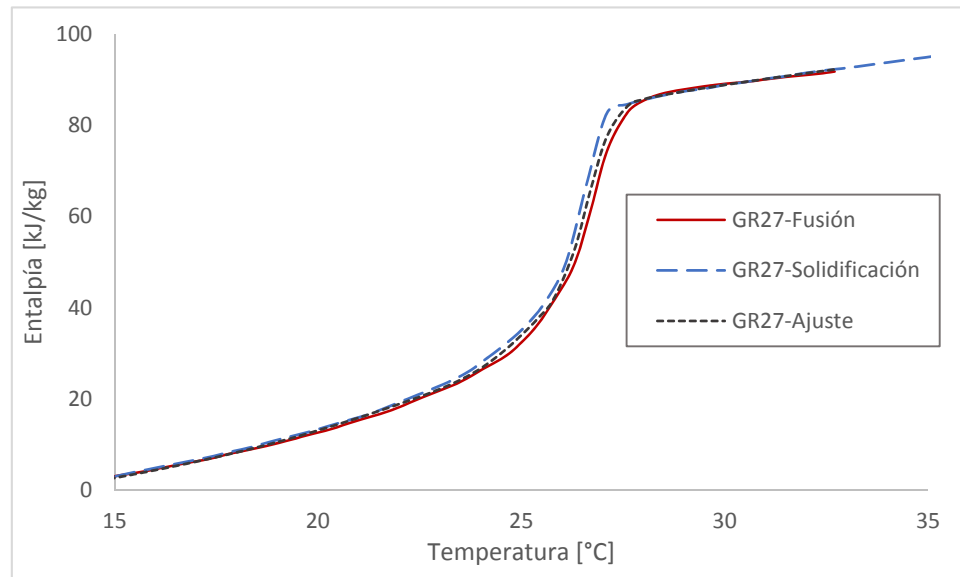


Fig. 7. 3. Ajuste, particularizado para el material GR27, de la expresión analítica de la curva h - T .

	$C_{p,s}$ [J/(kg·K)]	$C_{p,l}$ [J/(kg·K)]	$h_{m,1}; h_{m,2}; h_{m,3}$ [kJ/kg]	$T_{m,1}; T_{m,2}; T_{m,3}$ [°C]	$\Delta T_{m,1}; \Delta T_{m,2}; \Delta T_{m,3}$ [°C]	MRSD/ Δh
GR27	1550	1170	13,6; 15,8; 35,8	22,8; 25,3; 26,6	4,9; 1,5; 0,7	1,2%
GR31	1550	1070	12,9; 16,6; 33,8	25,7; 28,2; 29,5	3,7; 2,1; 1,9	1,0%
GR42	1680	1020	28,6; 7,6; 19,8	39,7; 40,6; 41,8	5; 2,1; 1,3	0,3%

Tabla 7. 4. Ajustes obtenidos para la expresión analítica de la curva h - T .

7.2.4. Cálculo del comportamiento de la bomba de calor

El funcionamiento de la bomba de calor aire-agua se calcula mediante el modelo empírico definido por las correlaciones proporcionadas por el fabricante CIAT para una de sus máquinas. Estas expresiones matemáticas permiten cuantificar el consumo eléctrico y la potencia de calefacción del equipo térmico cuando funciona en condiciones de plena carga y bajo unos niveles dados de temperatura del aire exterior (T_a) y del agua de

impulsión (T_w). Las correlaciones están constituidas por polinomios de segundo orden de dos variables (T_a , T_w), definidos como se muestra en la ecuación 2. Cuando la máquina opera a carga parcial, se aplica un factor que corrige, en función de la relación entre la energía térmica demandada y la máxima suministrable, su coeficiente de operación.

$$\dot{W}_{BC} = a + b \cdot T_w + c \cdot T_a + d \cdot T_w^2 + e \cdot T_a^2 + f \cdot T_w \cdot T_a \quad \text{Ec. 2}$$

7.2.5. Datos climáticos

En el caso de estudio se han utilizado las condiciones climáticas correspondientes a la ciudad de Córdoba extraídos de la base de datos del programa EnergyPlus. En la sección 7.4.2, en la que se amplía el estudio del comportamiento del sistema incluyendo otra localización, se ha incorporado la información correspondiente a Zaragoza que proviene del mismo conjunto de datos.

7.2.6. Tarifa eléctrica

En este análisis se ha tenido en cuenta como referencia únicamente el contexto económico español de costes de la energía eléctrica. De este modo, se ha escogido la tarifa con discriminación horaria para pequeños consumidores denominada 2.0DHA. Según el Real Decreto 647/2011 del 9 de mayo, los tramos horarios para el periodo invernal - [noviembre-marzo]- se establecen según muestra la tabla 7.5. En la misma tabla se recogen los precios de la energía considerados.

Periodo	Tramo horario	Precio de la energía eléctrica [€/ (kW·h)]
Valle	22-12h	0,183228
Punta	12-22h	0,06377

Tabla 7. 5. Tramos horarios y precios de la tarifa con discriminación horaria considerada en el capítulo (2.0DHA).

7.2.7. Sistema de control

Se propone un sistema de control sencillo para la regulación del funcionamiento del suelo radiante acoplado a la bomba de calor. En primer lugar, se utiliza una temperatura de consigna fija de 34°C para el agua caliente que suministra la máquina, suficiente para satisfacer la demanda de calefacción del cubículo. Por otro lado, la temperatura del aire interior se controla mediante el accionamiento de la circulación del fluido por el suelo radiante según un control todo o nada con una histéresis de $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Con el objetivo de aprovechar durante las horas punta de la tarifa eléctrica la energía térmica almacenada en el suelo radiante a lo largo del tramo valle, se utilizan dos niveles de temperaturas para el aire interior, según el periodo de demanda.

El algoritmo de control permite, durante el periodo anterior al tramo de mayor demanda eléctrica, que la temperatura del aire interior -y, consecuentemente, la de la masa

de la placa de suelo radiante- ascienda de forma leve. De este modo, la energía térmica asociada a dicho incremento se puede aprovechar durante las horas centrales del día. Barzin et al. (2015) propusieron un algoritmo de control similar que implementaron para la regulación de un suelo radiante eléctrico instalado en un cubículo experimental. El método estaba basado en la misma idea de gestionar el almacenamiento y liberación de la energía térmica en el elemento -y al mismo tiempo mantener la temperatura del aire dentro del rango de confort- a partir de un control todo o nada con histéresis sobre el ambiente interior en el que se definían dos niveles de temperatura de consigna que variaban según el precio de la electricidad.

Periodo horario	Temperatura de consigna para el aire interior	Temperatura de consigna para el agua de suministro
5:00-12:00h	23,5±0,5°C	34°C
0:00-4:59h 12:01-23:59h	20,5±0,5°C	34°C

Tabla 7. 6. Temperaturas de consigna para la temperatura del aire interior y la de suministro de la bomba de calor según el tramo horario.

7.3. Alternativas de diseño

En este apartado se plantean los parámetros principales considerados para el diseño del sistema de suelo radiante con PCM propuesto. Se analiza, así, la influencia de los siguientes aspectos:

- tipo de PCM: se comparan los resultados de la instalación con los materiales granulados analizados (*vid.* capítulo 3) GR27, GR31 y GR42. Este análisis permite estudiar la adecuación de sus respectivas curvas h-T para la aplicación que se propone.
- cantidad de PCM: se analiza la influencia en la operación de la instalación experimental de la cantidad del material de almacenamiento incluida en la placa de suelo radiante.
- ajuste de la separación entre tubos: se propone la modificación de la separación entre tubos con el objetivo de compensar la reducción de la emisión térmica del suelo radiante asociada a la disminución de la conductividad térmica del mortero que provoca la incorporación de PCM.

7.3.1. Compensación de la emisión térmica del suelo radiante

El ajuste de la separación entre tubos es la única solución técnica inmediata, para el sistema de suelo radiante propuesto, que permite compensar el efecto negativo de la disminución en la conductividad del compuesto al añadir PCM. Existen otras alternativas como el empleo de aletas o mallas metálicas que favorecen la transferencia de calor -ya estudiadas por Koschenz y Lehmann (2004) y Ansuini et al. (2011)- o la utilización de aditivos que permiten mejorar la conductividad del material -Kim et al. 2014 y 2014b-. Sin embargo, éstas requieren un trabajo específico, bien a través del estudio detallado de la

transferencia de calor en la placa de suelo radiante, en el primer caso, o bien relacionado con el desarrollo de nuevos materiales, en el segundo, que se consideran fuera del alcance de esta tesis.

Se denomina “emisión térmica”, dentro de la terminología utilizada por la norma EN 1264-1 (2012), al flujo de calor que proporciona el elemento en condiciones -estacionarias- de diseño. En relación con esta magnitud, se define el coeficiente de transmisión térmica equivalente K_H (Ec. 3, EN 1264-1), que relaciona el flujo de calor por unidad de superficie del elemento que se establece cuando se somete a la diferencia nominal de temperaturas entre el fluido caloportador (T_w) y el ambiente interior ($T_{op,a}$).

$$q'' = K_H \cdot (T_w - T_{op}) \quad \text{Ec. 3}$$

Este coeficiente se ha utilizado tradicionalmente en el dimensionamiento de los sistemas de suelo radiante. El mencionado proceso de cálculo se basa en asegurar que el elemento es capaz de suministrar, en condiciones nominales, la potencia de calefacción o refrigeración necesaria, en base a una estimación de demanda térmica realizada aparte. En las normas EN15377-2 (2008) -en la actualidad anulada por las normas EN 1264-3 y 1264-4 (2010)-, EN 1264-3 (2012) e ISO 11855-3 (2012)-, se ha propuesto este método basado en la evaluación de la operación en una situación estacionaria.

Si bien en el caso que ocupa a este trabajo el beneficio que proporciona la inclusión de PCM se obtiene a través de la operación dinámica del sistema, y, por tanto, el análisis de la situación estacionaria es insuficiente, se puede tomar el valor del coeficiente de transferencia de calor equivalente del elemento (K_H) como un indicativo sencillo del deterioro en la transferencia de calor que produce la incorporación de este material.

De esta manera, se propone como alternativa de diseño la compensación, mediante la reducción de la separación de tubos, del deterioro de la emisión térmica que ocasiona a adición de PCM. En la siguiente figura (figura 7.4) se muestran dos curvas (coloreadas en tonos grises) correspondientes a los sistemas de suelo radiante con distinta separación entre tubos que, en función de la cantidad de PCM incluido en la placa de mortero, poseen un coeficiente de transferencia de calor en condiciones de diseño K_H igual y un 5% inferior, respectivamente, al del sistema convencional sin almacenamiento latente.

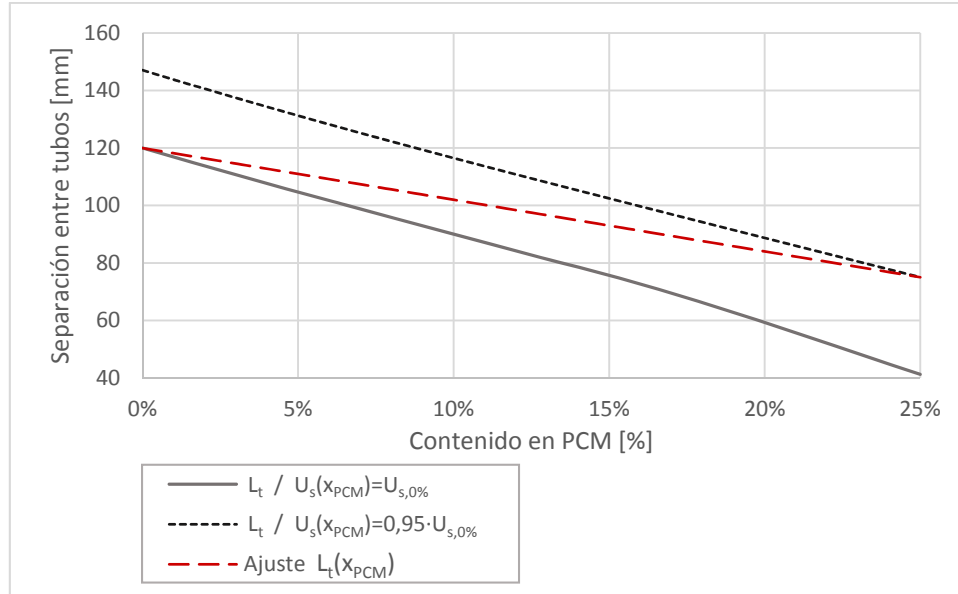


Fig. 7. 4. Criterio propuesto para la compensación de la emisión térmica del sistema de suelo radiante a través de la modificación de la distancia entre tubos.

Como se observa en la figura 7.4, cuando se impone la condición de mantener estrictamente constante la emisión térmica del sistema, se obtiene, en los casos con un mayor contenido de PCM, una distancia entre tubos excesivamente reducida (40mm) en comparación a su diámetro. En consecuencia, se ha propuesto relajar esta restricción mediante el uso de un ajuste lineal sencillo (Ec. 4), que relacione contenido en PCM y separación entre tubos y que asegure que para todas las composiciones la reducción de la emisión térmica no es superior al 5% con respecto a la del suelo radiante original.

$$L_t(x_{PCM}) = 120 - (120 - 80) \cdot \frac{x_{PCM}}{0,233} \quad [mm] \quad \text{Ec. 4}$$

No obstante, es preciso advertir que esta solución técnica no es capaz de compensar todos los efectos negativos de la adición de PCM. Aunque influye directamente tanto en la potencia que suministra el sistema en condiciones nominales -y por tanto en la energía térmica almacenada en esta situación-, como en el tiempo característico de respuesta durante el proceso de carga, a lo largo del proceso de descarga esta adaptación no produce una mejora en la transferencia de calor.

Por otro lado, esta alternativa de diseño introduce dos principales efectos negativos. En primer lugar, aumenta el coste en materiales del sistema -se puede tomar un valor orientativo del precio por unidad de longitud del tubo entre 1-1,15€/m (según base de datos de Cype y los catálogos de los fabricantes)-. En segundo término, aumenta consumo energético empleado en el bombeo. En este caso, se ha cuantificado este consumo adicional utilizando la correlación de Petukhov et al. (1970) para la estimación de las pérdidas de carga y se ha tomado un rendimiento constante de las bombas de impulsión de 0,85.

7.4. Análisis del funcionamiento

7.4.1. Operación durante un día tipo

En esta sección se muestra la comparación de los resultados de las simulaciones durante un día de invierno (26 de enero, Córdoba) para ambos sistemas –con y sin PCM– con el principal objetivo de mostrar la influencia del almacenamiento de energía térmica latente en la instalación analizada. A partir de los datos climáticos disponibles para la ciudad de Córdoba, se ha seleccionado para este primer análisis un día con una demanda alta de calefacción, de tal manera que se asegure que el sistema es capaz de suministrar la potencia necesaria en condiciones desfavorables. En la figura 7.5 se representa el diagrama de frecuencia relativa acumulada del promedio diario de la demanda horaria de calefacción por unidad de superficie del cubículo experimental durante el periodo invernal, que abarca los días comprendidos entre el 1 de noviembre y el 28 de febrero (ambos incluidos). La demanda del día seleccionado para esta primera evaluación es superior a la del 95% de los días pertenecientes a dicha temporada.

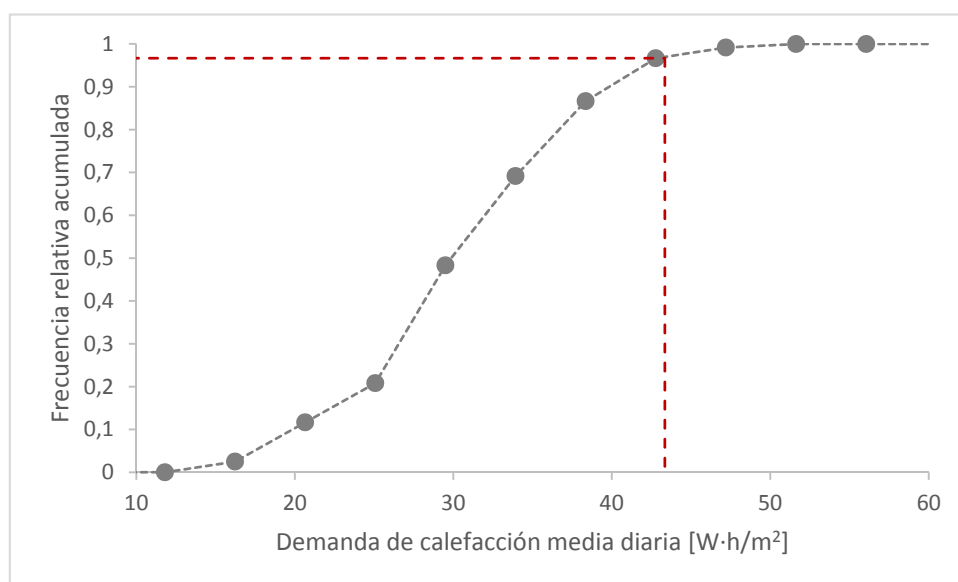


Fig. 7. 5. Gráfico de la frecuencia relativa acumulada del promedio diario de la demanda horaria de calefacción por unidad de superficie [$\text{W}\cdot\text{h}/\text{m}^2$] durante el periodo de cálculo (1 de noviembre-28 de febrero, Córdoba).

En la siguiente figura (fig. 7.6) se muestra la evolución temporal calculada para ambos sistemas de suelo radiante, con y sin PCM, de la temperatura del ambiente interior y de la potencia eléctrica consumida por la bomba de calor a lo largo del día invernal seleccionado. En este caso, el suelo radiante con una capacidad de almacenamiento térmico mejorada contiene un 25% de PCM (GR27) y se ha empleado una separación entre tubos de 120mm. El análisis de la solución técnica basada en la reducción de esta distancia, se analiza, más adelante, en la sección 7.4.2.1.

Se toma como estimación de la temperatura ambiente interior del cubículo la temperatura operativa (T_{op}). Si se asume que la velocidad del aire no es superior a 0,2m/s y la diferencia entre la temperatura del aire ($T_{a,int}$) y la media radiante (T_{mr}) es inferior a 4K, dicha temperatura operativa se puede calcular, según la norma ASHRAE 55 (2013), como el promedio de las anteriores (Ec. 5).

$$T_{op} = \frac{T_{a,int} + T_{mr}}{2} \quad Ec. 5$$

Por otro lado, la potencia eléctrica que en cada instante consume la bomba de calor se prorratea a la superficie del cubículo. Como se observa en la figura 7.6, el PCM proporciona una inercia térmica adicional que permite el desplazamiento, en este caso, de la práctica totalidad de la energía eléctrica consumida por la bomba de calor a las horas valle de demanda eléctrica. Es preciso señalar que este traslado del consumo eléctrico implica cierta oscilación térmica (20-25°C) en el ambiente interior, asociada a los procesos de carga y descarga.

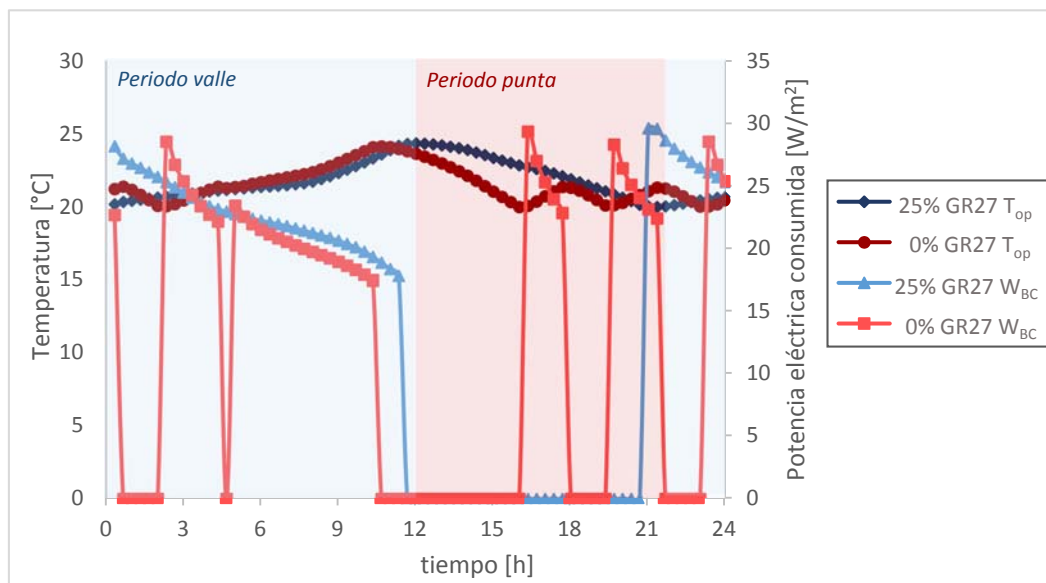


Fig. 7. 6. Comparativa entre el funcionamiento del sistema de suelo radiante con y sin PCM (25% GR27, 26 de enero, Córdoba).

En las figuras 7.7 y 7.8 se ilustra de manera gráfica el proceso de almacenamiento y liberación de energía térmica en ambos sistemas de suelo radiante a lo largo del día tipo. En la primera de ellas, se comparan sendos consumos energéticos con la demanda de calefacción del cubículo experimental. Además, se solapa a esta representación la evolución de la temperatura promedio de cada elemento de construcción activo. Esta temperatura media, correspondiente a la placa de mortero de suelo radiante, se calcula mediante la ecuación 6. En su evolución se puede apreciar el cambio de fase, que tiene lugar en los periodos del día en los que permanece más estable. Como se observa, la temperatura del

sistema con PCM (GR27) se mantiene la mayor parte del ciclo diario dentro del rango de temperaturas de cambio de fase.

$$\bar{T} = h^{-1} \left(\frac{\int_{x=0}^{e_s} h(T(x)) \cdot dx}{e_s} \right) \quad \text{Ec. 6}$$

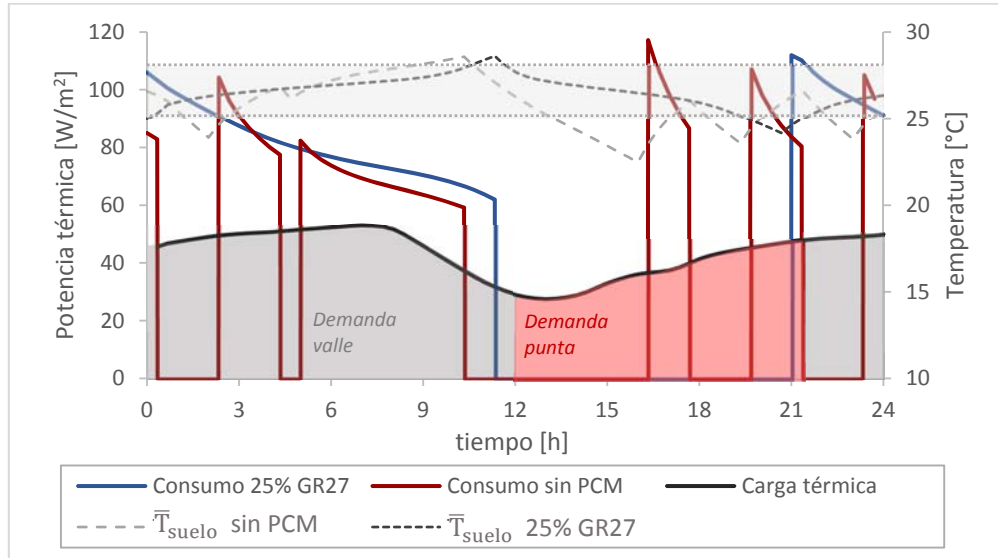


Fig. 7. 7. Evolución de la potencia consumida y suministrada por ambos sistemas de suelo radiante durante el día completo (26 de enero, Córdoba).

Por otro lado, en la figura 7.8 se representa la relación entre la temperatura promedio de la placa de mortero -con y sin PCM- y la energía almacenada en la misma por unidad de superficie, evaluadas ambas en cada instante de cálculo del día completo analizado. En el intervalo de temperaturas de funcionamiento propio de cada sistema, la cantidad de energía almacenada en el suelo radiante con almacenamiento latente aproximadamente duplica (2,3 veces) a la del elemento convencional. Además, en la gráfica se relaciona esta variación con la energía térmica requerida para calefacción durante el periodo punta de demanda eléctrica (D_c) y las fracciones de la energía almacenada que, respectivamente, se emplean finalmente para dicho propósito (ΔE_c) y se pierden a través del aislamiento del elemento durante el proceso de descarga que tiene lugar en las horas centrales del día (P). Se observa que en este cubículo experimental la capacidad de almacenamiento del sistema tradicional no es suficiente para satisfacer la demanda de calefacción del periodo punta del día analizado.

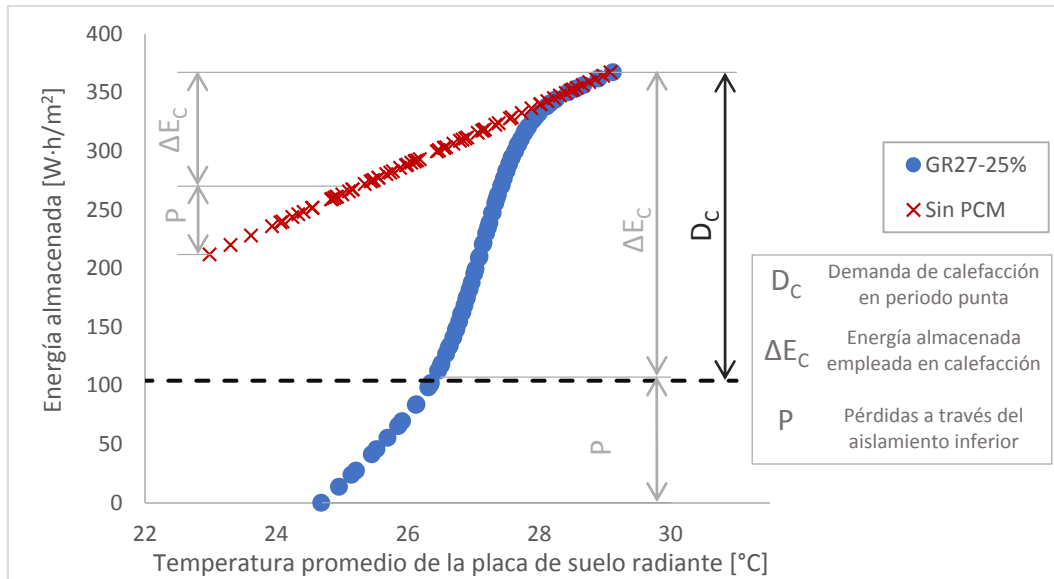


Fig. 7. 8. Representación, para ambas placas de suelo radiante (sin PCM y 25% de GR27), de la energía térmica almacenada y la temperatura promedio calculadas durante un día completo (26 de enero, Córdoba).

7.4.1.1. Influencia del PCM seleccionado

En este apartado se analiza la influencia del PCM en el funcionamiento del sistema durante el día invernal que se ha utilizado anteriormente. El propósito es, en este caso, escoger el material, entre los preseleccionados en el capítulo 3 (GR27, 31 y 42), que posee la curva h-T más adecuada para esta aplicación concreta.

Con el objetivo de ilustrar este análisis comparativo, se muestra en la figura 7.9 el contraste entre el funcionamiento del sistema calculado con dos PCM: GR27 y GR31. Debido a que el segundo material posee una temperatura de cambio de fase aproximadamente 4°C superior, se ha aumentado en igual valor la temperatura de consigna para el agua de impulsión, con la intención de lograr una activación similar del proceso de cambio de fase. Sin embargo, como muestra la figura 7.10, no se llega a aprovechar durante el ciclo completo toda la energía asociada a esta transición. Asimismo, el empleo de una temperatura de consigna más elevada provoca un leve aumento de las pérdidas a través del aislamiento situado bajo el suelo (fig. 7.10) y de la temperatura operativa interior (fig. 7.9). Los resultados obtenidos con el material GR42, cuya representación se omite en este documento, son aún más desfavorables, por lo que se selecciona definitivamente para esta aplicación el granulado GR27.

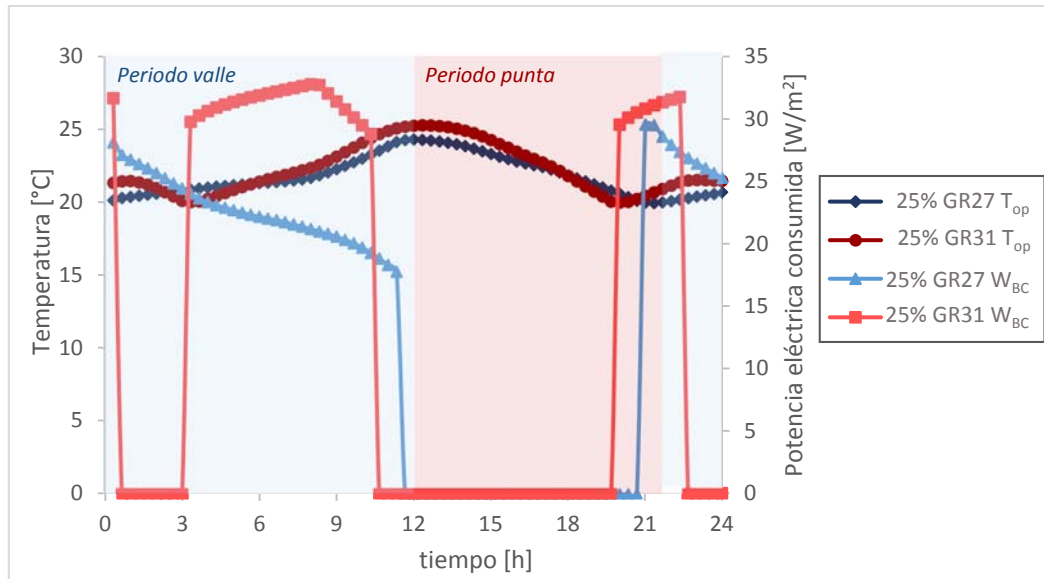


Fig. 7. 9. Comparación del funcionamiento, durante el día invernal seleccionado (26 de enero, Córdoba), calculado con los materiales GR27 y GR31 (25% en masa).

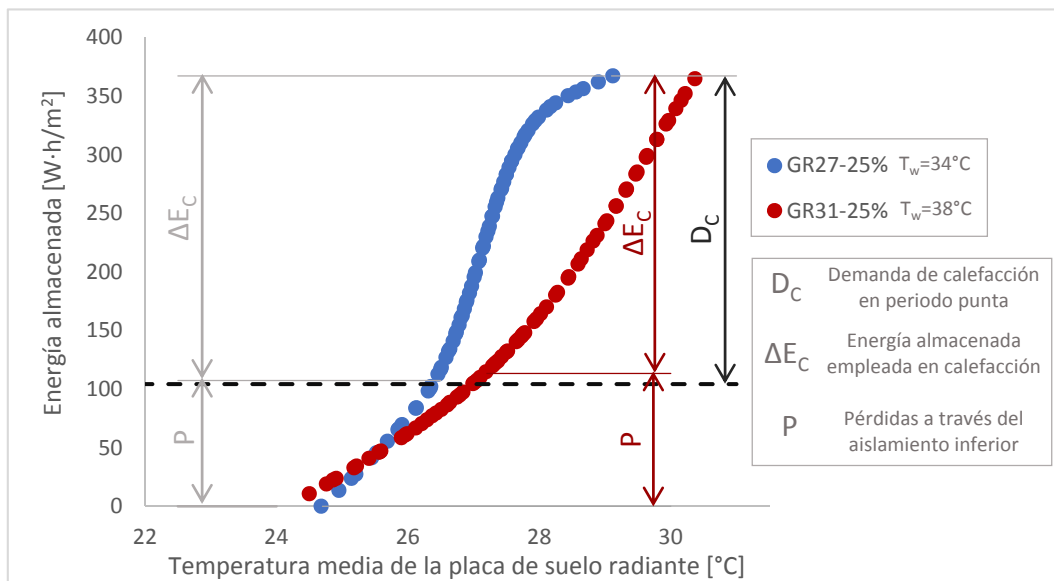


Fig. 7. 10. Variación durante el día de estudio (26 de enero, Córdoba) de la energía térmica de la placa de mortero de suelo radiante en los dos sistemas analizados (GR27 y GR31, 25% en masa).

7.4.2. Análisis del funcionamiento durante una temporada completa

Se ha realizado la simulación del periodo comprendido entre el 1 de noviembre al 28 de febrero, teniendo en cuenta los información climática de la base de datos de EnergyPlus para la ciudad de Córdoba. En la tabla 7.7 se resume la información del consumo energético durante el periodo de cálculo. Se comparan estos resultados con los del caso en el que el mismo cubículo experimental, con un suelo radiante sin PCM, se regula manteniendo una consigna de temperatura constante para el aire interior. Esta situación

adicional pretende representar un modo de operación en el que no se aprovecha estratégicamente la capacidad de almacenamiento del sistema.

Sistema	Temperatura de consigna del aire interior [°C]	Consumo eléctrico diario medio [W·h/(m ² ·d)]	Consumo eléctrico diario medio en periodo punta [W·h/(m ² ·d)]	Coste medio [€/m ²]	Ahorro económico [%]
0% PCM L _t =120mm	T _c =22,5°C	225	58	2,56	-
0% PCM L _t =120mm	5-12h: T _c =23,5°C 12-5h: T _c =20,5°C	227	35	2,24	- (13%)
25% PCM L _t =120mm	5-12h: T _c =23,5°C 12-5h: T _c =20,5°C	237	7	1,92	14% (25%)
25% PCM L _t =80mm	5-12h: T _c =23,5°C 12-5h: T _c =20,5°C	240	3	1,88	16% (27%)

Tabla 7. 7. Resumen de los resultados de la simulación del cubículo experimental durante un periodo invernal completo (1 de noviembre-28 de febrero).

Los resultados muestran que gracias al almacenamiento térmico latente es posible reducir el coste de la energía eléctrica consumida hasta en un 16% a través del traslado de más del 90% del consumo eléctrico de la bomba de calor a las horas valle de demanda. Si se comparan los resultados con el caso en el que no se aprovecha la masa térmica del elemento activo, el ahorro económico es superior, alcanza el 25-27%.

Sin embargo, es preciso señalar que el algoritmo de control implementado en las simulaciones produce un sobrecalentamiento del ambiente interior durante los días con baja demanda de calefacción. Este efecto negativo se debe a dos razones: por una parte, a la baja inercia térmica del cubículo experimental -notablemente inferior a la de un edificio convencional- y, por otra parte, al exceso de energía almacenada en el elemento activo. En la figura 7.11 se muestra, a modo de ejemplo, la evolución de la temperatura operativa interior y el consumo de energía eléctrica de sendos sistemas -con y sin PCM- durante otro día invernal (20 de diciembre, Córdoba), caracterizado por una baja demanda de energía durante las horas punta, en el que tiene lugar el mencionado fenómeno de sobrecalentamiento. En su transcurso, se observa cómo la capacidad de almacenamiento del sistema convencional (sin PCM) es prácticamente suficiente para desplazar el consumo de energía eléctrica de la bomba de calor a las horas valle. Esto implica, necesariamente, que la capacidad de almacenamiento del sistema con PCM (25% GR27) está sobredimensionada para hacer frente a un perfil de demanda de calefacción de este tipo.

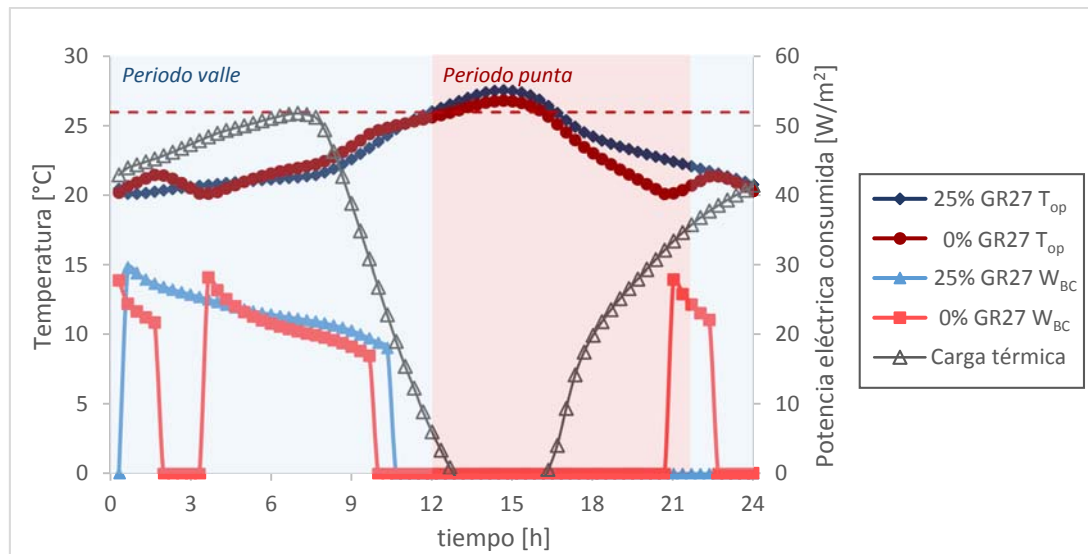


Fig. 7.11. Comparativa entre el funcionamiento del sistema de suelo radiante con y sin PCM (25% GR27, 20 de diciembre, Córdoba).

En la siguiente figura (fig. 7.12), se muestra el gráfico de frecuencia relativa acumulada de la temperatura operativa de los cubículos experimentales, con y sin PCM. El mencionado efecto de sobrecalentamiento supone aproximadamente un 10% ($T_{op} > 26^{\circ}\text{C}$) del periodo completo de simulación. Por otro lado, en la figura 7.13, se representa la interrelación entre la temperatura operativa promedio durante las horas centrales del día (12-16h) y la demanda térmica media de calefacción correspondiente al mismo intervalo temporal. La gráfica, que muestra la notable correlación entre ambas variables en el sistema analizado, permite afirmar, a través de la envolvente de los puntos, que el sistema de control utilizado es adecuado sólo si la demanda promedio de calefacción durante las horas centrales del día (12-16h) supera cierto valor (14W/m^2 , si se desea evitar un sobrecalentamiento por encima de 25°C).

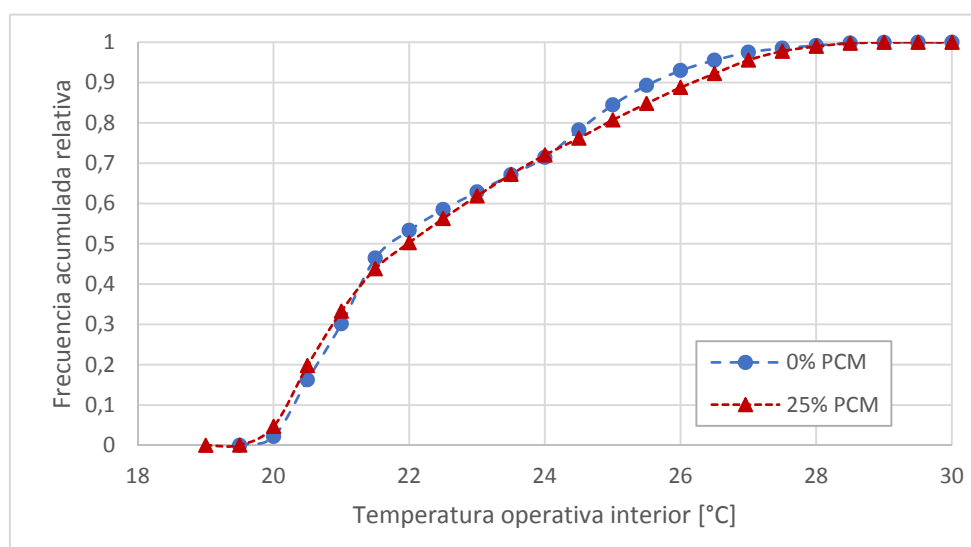


Fig. 7.12. Gráfico de frecuencia relativa acumulada de la temperatura operativa interior (periodo de cálculo: 1 de noviembre-28 de febrero, Córdoba).

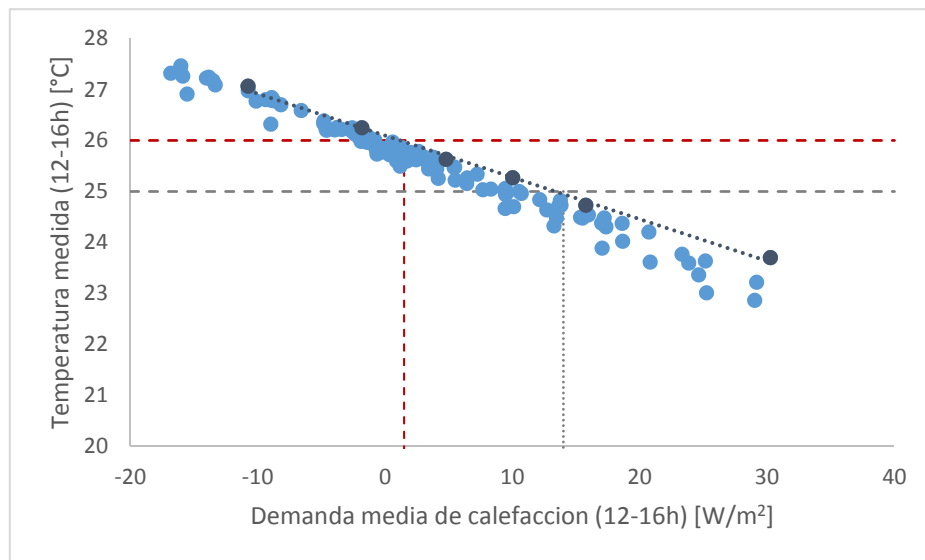


Fig. 7. 13. Relación entre el promedio temperatura operativa durante las horas centrales del día (12-16h) y la demanda de calefacción media del mismo periodo (1 de noviembre-28 de febrero, Córdoba).

En esta sección, los resultados muestran el potencial de la capacidad de almacenamiento adicional que incorpora el PCM para obtener un aprovechamiento del traslado de la demanda de calefacción del cubículo experimental. Sin embargo, evidencian que el sencillo algoritmo de control propuesto produce un sobrecalentamiento en los días en los que la demanda de calefacción cae en las horas centrales por debajo de un determinado límite. Conviene señalar que el modo en el que se realiza el proceso de carga del suelo radiante -en este caso, a través de la elevación de la temperatura de consigna y durante un cierto tiempo- no obtiene una realimentación adecuada acerca de la posible demanda de calefacción para el día siguiente. La regulación de este proceso de suministro de energía térmica al elemento activo de acuerdo con cierta estimación de la demanda de calefacción del día siguiente se considera necesaria para obtener un funcionamiento adecuado del sistema.

Debido a que el sistema y la estrategia de operación propuestos presentan ciertos problemas cuando la demanda de calefacción es baja, se ha incorporado a este análisis la simulación del mismo periodo de cálculo bajo unas condiciones climáticas más favorables (desde el punto de vista de la adecuación del sistema). Con este propósito, se ha tomado la información climática de la base de datos de EnergyPlus correspondientes a la ciudad de Zaragoza. El objetivo de esta ampliación de las condiciones ambientales no es el de elaborar un estudio sistemático acerca de la operación del sistema de suelo radiante con PCM en distintas zonas climáticas. Sin embargo, este análisis comparativo, que considera ambas localizaciones, puede ser ilustrativo de la influencia de la demanda de calefacción en el diseño del sistema propuesto.

Si se utilizan los datos climáticos de Zaragoza, los resultados de las simulaciones muestran un funcionamiento más adecuado del sistema de suelo radiante -y algoritmo de control asociado- propuesto. En la figura 7.14, en la que se representa el gráfico de

frecuencia relativa acumulada de la temperatura operativa, se comprueba que el 98% del tiempo el ambiente interior se mantiene entre los 19,5 y 26°C. En esta figura se muestra una diferencia levemente sensible en las temperaturas mínimas de los sistemas con y sin PCM. Este efecto está relacionado con el mayor retraso en la respuesta del sistema con PCM cuando se reactiva el funcionamiento durante las horas finales de la tarde. En este sentido, se observa cómo la reducción del espaciado entre tubos, que permite disminuir este tiempo de respuesta, evita el mencionado descenso de la temperatura.

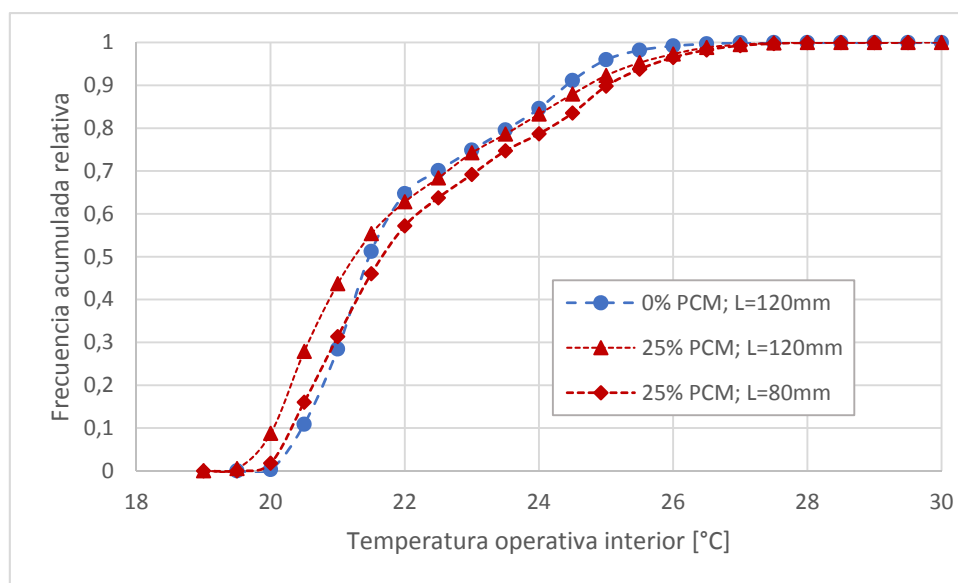


Fig. 7. 14. Representación de la frecuencia acumulada de la temperatura operativa interior (periodo de cálculo: 1 de noviembre-28 de febrero; datos climáticos: Zaragoza).

7.4.2.1. Influencia de la cantidad de PCM

En los resultados numéricos presentados hasta el momento se ha realizado el análisis comparativo del comportamiento del sistema de suelo radiante convencional y el equivalente con un contenido de PCM máximo (en relación a los materiales analizados en el capítulo 4). En este apartado se analiza cuál es el efecto de la cantidad de PCM en la operación durante el periodo invernal seleccionado en las dos localizaciones propuestas (Córdoba y Zaragoza).

En las figuras 7.15 y 7.16 se presenta la dependencia con la cantidad de PCM incluida en la placa de mortero del consumo eléctrico medio diario calculado utilizando ambos conjuntos de datos climáticos durante el periodo completo de simulación establecido (1 de noviembre-28 de febrero). Como se observa, la principal influencia de la inclusión de este material es el aumento de la cantidad de energía eléctrica que se consume durante las horas valle de demanda. Por el contrario, la dependencia del consumo eléctrico total con respecto a esta variable es más leve. En las tablas 7.8 y 7.9 se recogen los principales valores relacionados con el consumo y su consiguiente coste económico obtenidos a partir de los resultados de las simulaciones.

Además, los resultados muestran que, si se reduce el paso entre tubos conforme aumenta la cantidad de PCM, se obtiene un ahorro adicional en los sistemas con mayor capacidad de almacenamiento. Este ahorro se debe al traslado de una mayor parte de la energía eléctrica consumida al tramo valle de demanda. Sin embargo, en relación al sobrecoste en materiales asociado a la longitud del tubo embebido en la placa (0,99-1,15€/m (Cype) en torno a 4,1-4,8€/m² para una separación de 80mm), la mejora que introduce esta solución no resulta rentable para esta aplicación.

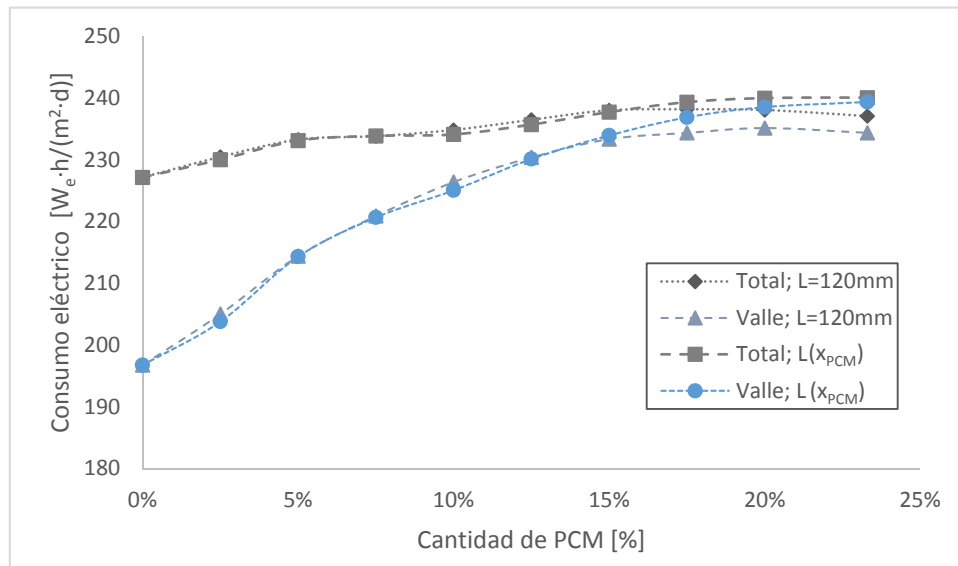


Fig. 7. 15. Influencia del contenido de PCM (porcentaje másico) en el consumo energético (1 de noviembre- 28 de febrero; datos climáticos: Córdoba).

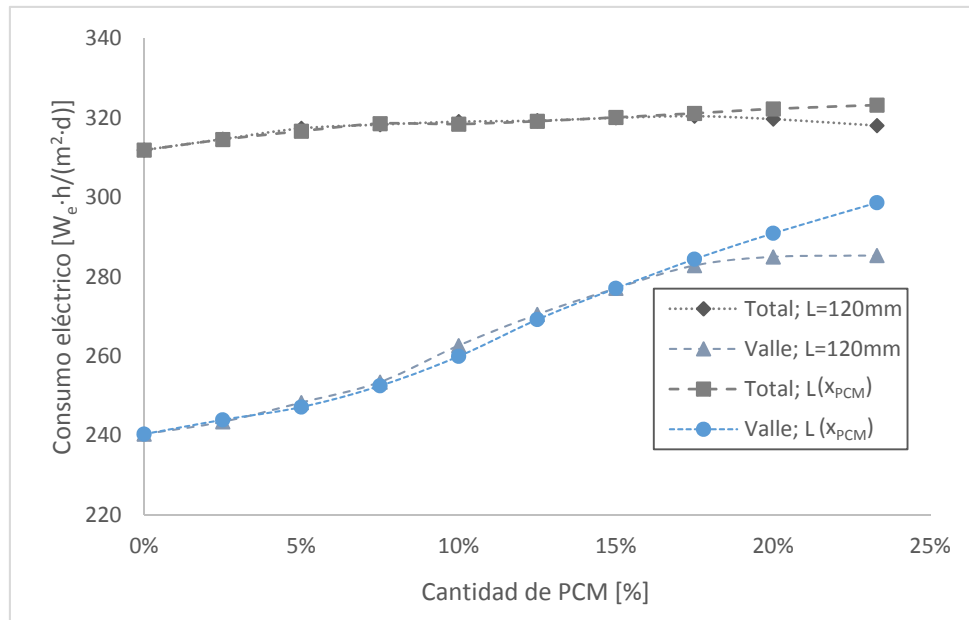


Fig. 7. 16. Influencia del contenido de PCM (porcentaje másico) en el consumo energético (1 de noviembre- 28 de febrero; datos climáticos: Zaragoza).

x_{PCM}	$L_t=120\text{mm}$			$L_t=[120-(120-80)\cdot x_{PCM}/0,25]\text{ mm}$		
	$\bar{W}_{BC}\text{ total}$ [$W_e\cdot h/(d\cdot m^2)$]	$\bar{W}_{BC}\text{ punta}$ [$W_e\cdot h/(d\cdot m^2)$]	Ahorro [€/m ²]	$\bar{W}_{BC}\text{ total}$ [$W_e\cdot h/(d\cdot m^2)$]	$\bar{W}_{BC}\text{ punta}$ [$W_e\cdot h/(d\cdot m^2)$]	Ahorro [€/m ²]
0%	227	30,4	-	-	-	-
5%	233	18,9	0,12 (6%)	233	18,8	0,12 (6%)
10%	235	8,4	0,26 (13%)	234	9,0	0,26 (12%)
15%	238	4,7	0,31 (14%)	238	3,8	0,29 (15%)
20%	238	2,9	0,32 (15%)	240	1,5	0,32 (16%)
25%	237	2,7	0,33 (16%)	240	0,7	0,33 (16%)

Tabla 7. 8. Consumos energéticos y ahorros calculados para las dos configuraciones (1 de noviembre- 28 de febrero; datos climáticos: Córdoba).

x_{PCM}	$L_t=120\text{mm}$			$L_t=[120-(120-80)\cdot x_{PCM}/0,25]\text{ mm}$		
	$\bar{W}_{BC}\text{ total}$ [$W_e\cdot h/(d\cdot m^2)$]	$\bar{W}_{BC}\text{ punta}$ [$W_e\cdot h/(d\cdot m^2)$]	Ahorro [€/m ²]	$\bar{W}_{BC}\text{ total}$ [$W_e\cdot h/(d\cdot m^2)$]	$\bar{W}_{BC}\text{ punta}$ [$W_e\cdot h/(d\cdot m^2)$]	Ahorro [€/m ²]
0%	312	71,6	-	-	-	-
5%	317	69,1	0,00	317	69,5	0,00
10%	319	56,4	0,17 (5%)	318	58,5	0,14 (4%)
15%	320	43,0	0,35 (11%)	320	43,0	0,35 (11%)
20%	320	34,7	0,47 (14%)	322	31,3	0,50 (15%)
25%	318	32,8	0,51 (16%)	323	24,6	0,60 (18%)

Tabla 7. 9. Consumos energéticos y ahorros calculados para las dos configuraciones (1 de noviembre- 28 de febrero; datos climáticos: Zaragoza)

7.4.2.1a. Análisis de la inversión

Debido a que en esta aplicación el beneficio directo obtenido a partir de la gestión de la energía que consume el suelo radiante con PCM es puramente económico, se aborda en esta sección el estudio de la influencia que tiene la cantidad de dicho material incluida en el mortero del suelo en la rentabilidad de la inversión. En este primer análisis se ha tomado como principal indicador la expresión simplificada -es decir, sin tener en cuenta el coste del capital- del periodo de retorno.

Por otra parte, la inversión se ha estudiado mediante comparación con un sistema de suelo radiante tradicional que opera bajo las mismas circunstancias (demanda de calefacción y sistema de control). Así pues, se plantea en primer lugar la formulación de las expresiones que permiten evaluar dicho periodo de retorno.

Una vez descartada la opción de compensar mediante la separación entre tubos el deterioro de la conductividad térmica del mortero (*vid.* Sección 7.4.2.1), se ha considerado que el único sobrecoste que introduce el elemento con PCM en relación al suelo radiante tradicional es el correspondiente al material de almacenamiento que se incluye. Hay que tener en cuenta, según el criterio utilizado para la preparación de los morteros analizados (*vid.* Capítulo 4, sección 4.2), que el material granulado con PCM que se incorpora sustituye a una masa equivalente de áridos, por lo que es preciso descontar el coste correspondiente. De este modo, la inversión inicial, expresada por unidad de superficie, debida a la inclusión de PCM en una proporción másica x_{PCM} en el mortero, se puede formular mediante la ecuación

7, en función de la proporción de áridos del mortero original ($x_{ar,0}$) y los respectivos precios de los materiales (p_{PCM} y p_{ar}).

$$I_0 = e_s \cdot \rho_m \cdot p_{PCM} \cdot \left[x_{PCM} \cdot \frac{\rho_m}{\rho_m - PCM(x_{PCM})} \cdot \left(1 - \frac{p_{ar}}{p_{PCM}} \right) - x_{ar,0} \cdot \frac{p_{ar}}{p_{PCM}} \cdot \left(1 - \frac{\rho_m}{\rho_m - PCM(x_{PCM})} \right) \right] \quad Ec. 7$$

Por otro lado, el ahorro anual (A) se puede formular, a partir del consumo eléctrico total (E_T) y el correspondiente al periodo de demanda punta (E_p), como muestra la ecuación 8.

$$A = E_{T,0\% PCM} \cdot p_v + E_{P,0\% PCM} \cdot (p_p - p_v) - E_{T,x\% PCM} \cdot p_v - E_{P,x\% PCM} \cdot (p_p - p_v) \quad Ec. 8$$

Donde p_v y p_p son los costes de la energía eléctrica [€/kW·h] correspondientes, respectivamente, al periodo valle y punta.

Las tendencias calculadas, conforme varía la capacidad de almacenamiento térmico del suelo radiante, de los consumos eléctricos en los dos tramos de demanda, se pueden utilizar para obtener conclusiones relevantes acerca de la optimización de este parámetro de diseño (x_{PCM}). Estos razonamientos se desarrollan a continuación.

En primer lugar, si se desprecia la variación de la energía total consumida por el sistema al aumentar su contenido de PCM o, de forma más amplia, se admite que se cumple la relación que propone la ecuación 9, se obtiene una expresión simplificada (Ec. 10) del periodo de retorno que tiene implicaciones importantes.

$$\frac{(E_{T,0\% PCM} - E_{T,x\% PCM}) \cdot p_v}{(E_{P,0\% PCM} - E_{P,x\% PCM}) \cdot (p_p - p_v)} \ll 1 \quad Ec. 9$$

$$PR \approx \frac{I_0}{(E_{P,0\% PCM} - E_{P,x\% PCM}) \cdot (p_p - p_v)} \quad Ec. 10$$

La ecuación 9 indica que, en primera aproximación, la cantidad de PCM que optimiza la inversión no depende de los precios de la electricidad. Al mismo tiempo, esta cantidad óptima tampoco se ve afectada por la relación de estos costes con el del PCM.

Por otra parte, si se asume que el precio del PCM es considerablemente superior al de los áridos (aproximadamente 0,3€/kg, según la base de datos de Cype) sustituidos en cada formulación de compuesto de mortero, el periodo de retorno queda simplificado mediante la siguiente expresión (Ec. 11):

$$PR \approx \frac{e_s \cdot \rho_m - PCM(x_{PCM}) \cdot x_{PCM} \cdot p_{PCM}}{(E_{P,0\% PCM} - E_{P,x\% PCM}) \cdot (p_p - p_v)} \quad Ec. 11$$

Si se acepta esta suposición adicional, se concluye que el punto óptimo depende únicamente de la relación entre la cantidad de PCM incluida ($x_{PCM} \cdot \rho_{m-PCM}$) y el consumo de energía eléctrica que se desplaza, con respecto al sistema tradicional, desde el periodo punta al tramo horario valle ($E_{p,0\%PCM} - E_{p,x\%PCM}$). Además, esta aproximación muestra que el periodo de retorno es aproximadamente proporcional al coeficiente $p_{PCM}/(p_p - p_v)$. De este modo, aunque la instalación se encuentre en su punto de diseño óptimo (x_{PCM}), esta relación entre costes siempre será un factor determinante en la viabilidad económica de la inversión.

7.4.2.1b. Influencia del contenido en PCM sobre la rentabilidad de la inversión

En la figura 7.17 se muestra la dependencia con la cantidad de PCM del ahorro económico en términos porcentuales, obtenido a partir de la simulación del cubículo experimental con los datos climáticos de las dos localizaciones. La evolución del ahorro es siempre creciente, dentro del rango de valores analizado, con el aumento del contenido en PCM. No obstante, se observa una saturación de su crecimiento a partir de cierto valor del porcentaje másico del material de almacenamiento. Asimismo, en los resultados obtenidos para los datos climáticos de Zaragoza, que exigen una mayor demanda de calefacción, la cantidad de PCM que permite alcanzar un ahorro relativo equivalente al obtenido a partir de la información meteorológica de Córdoba es mayor.

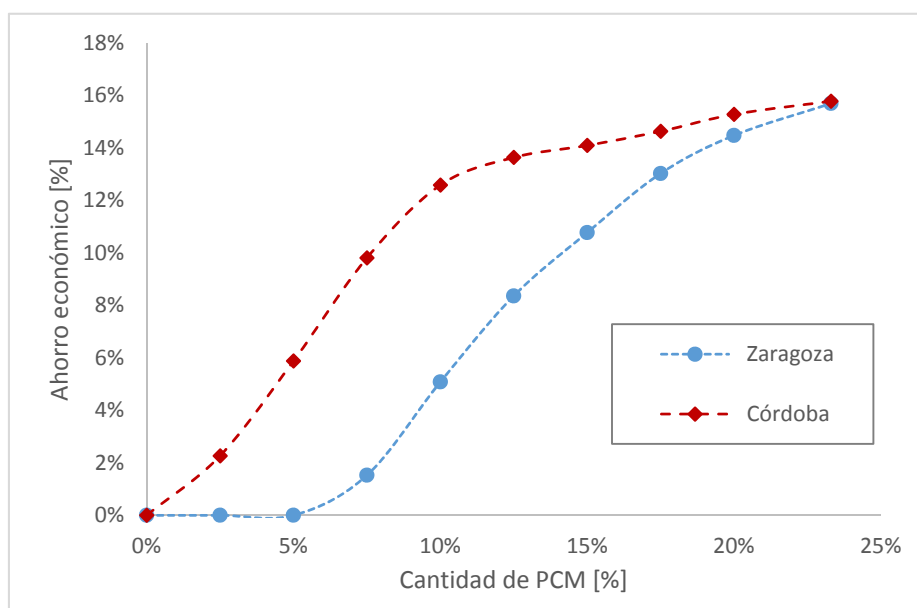


Fig. 7. 17. Dependencia del ahorro económico en el coste de la energía eléctrica consumida con el porcentaje másico de PCM en la placa de mortero.

De forma complementaria, se plantea el análisis de la eficacia con que la energía almacenada en el PCM es capaz de evitar, con respecto al caso de sistema convencional, el consumo eléctrico de la bomba de calor durante el tramo horario de demanda punta. Se ha propuesto, con este fin, la definición de un factor (f_{ef}) que relacione la energía térmica media

diaria que se deja de consumir durante el periodo punta con la cantidad máxima de energía adicional que es capaz de almacenar el suelo radiante con PCM, con respecto al convencional (Ec. 12). Ambas cuantificaciones, calculadas a partir del promedio, en el primer caso, o utilizando los valores extremos de la solución numérica, en el segundo, se calculan con respecto al periodo completo de simulación (1 de noviembre- 28 de febrero).

$$f_{ef} = \frac{\bar{Q}_{SR,P}(x_{PCM}=0) - \bar{Q}_{SR,P}(x_{PCM})}{\Delta H_{SR}(x_{PCM})|_{max} - \Delta H_{SR}(x_{PCM}=0)|_{max}} \quad Ec. 12$$

En la figura 7.18 se muestra la evolución con la cantidad de PCM de este factor (f_{ef}) cuantificado a partir de los datos numéricos obtenidos en las dos localizaciones. De forma conjunta, se representan en la misma figura la variación máxima diaria de la energía térmica almacenada en el sistema ($\Delta H_{SR}(x_{PCM})|_{max}$) y la cantidad de energía térmica que se deja de consumir en el periodo punta debido al aumento de la capacidad de almacenamiento ($\bar{\Delta Q}_{SR,P} = \bar{Q}_{SR,P}(x_{PCM} = 0) - \bar{Q}_{SR,P}(x_{PCM})$). En esta instalación experimental, sujeta al sistema de control propuesto, se ha obtenido un valor alto de este coeficiente para determinados diseños, en torno al 90%. El valor es mayor, incluso, al que se puede estimar a partir del porcentaje de pérdidas a través del aislamiento del suelo radiante (representado de forma gráfica en las figura 7.7 y 7.9). Este hecho se debe a que la energía térmica con la que se alimenta el suelo radiante durante las horas de demanda punta, una vez que la temperatura del ambiente interior decae lo suficiente, no se emplea únicamente para satisfacer la demanda de calefacción, sino que, inevitablemente, parte de ella se almacena de nuevo en la masa del elemento. Además, este efecto se puede ver afectado por la amplitud de la histéresis del control de temperatura del aire interior, ya que exige, hasta la siguiente desconexión, el aumento de la temperatura del componente por encima de cierto nivel superior.

Por otro lado, en la figura 7.18 se observa cómo decae el factor propuesto (f_{ef}) conforme se sobredimensiona, en relación a la demanda de calefacción durante el periodo punta, la capacidad de almacenamiento del sistema. Un ejemplo del funcionamiento de la instalación en estos casos se ha mostrado previamente en la figura 7.11.

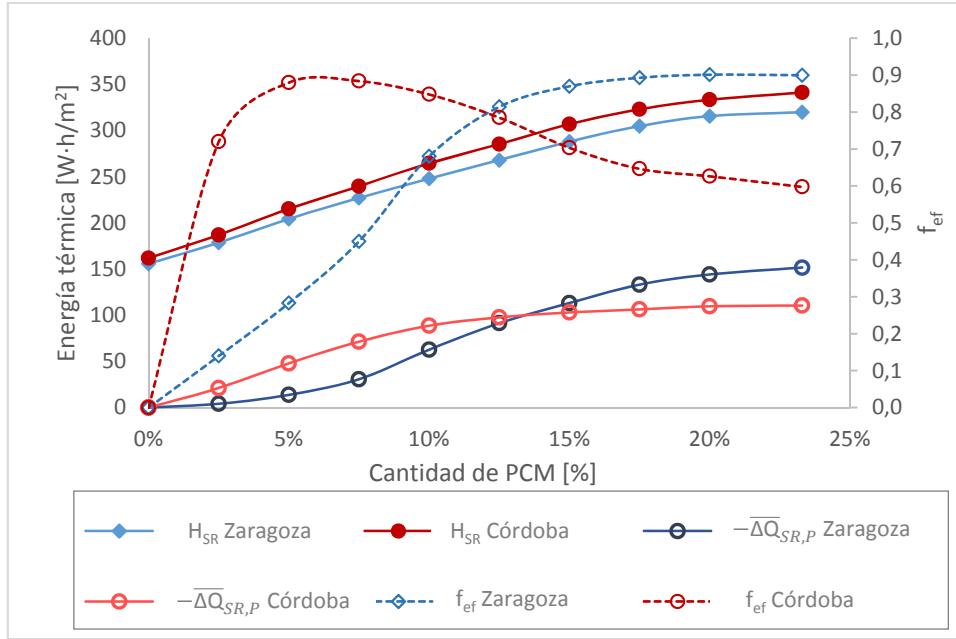


Fig. 7. 18. Representación de la eficacia (f_{ef}) del almacenamiento térmico adicional del sistema de suelo radiante con PCM para evitar el consumo de energía durante las horas de demanda punta.

En la figura 7.19 se representa, por un lado, la variación del factor vinculado a la eficacia de la capacidad de almacenamiento adicional del suelo radiante (f_{ef}) y, por otro lado, la del número adimensional asociado a la expresión simplificada del periodo de retorno que se define en la ecuación 13. Esta formulación permite identificar el óptimo de esta estimación de la inversión económica sin necesidad de dar un valor al coste del PCM. Esta formulación permite estimar la localización del valor del contenido en PCM que optimiza la inversión económica sin necesidad de dar un valor al coste de dicho material¹⁵. En ella, la expresión c_{W_e} representa el coste económico de la energía eléctrica consumida.

$$PR^* = x_{PCM} \cdot \frac{\rho_{m-PCM}(x_{PCM})}{\rho_m} \cdot \frac{c_{W_e}(x_{PCM}=0)}{c_{W_e}(x_{PCM}=0) - c_{W_e}(x_{CM})} \quad Ec. 13$$

¹⁵ La influencia del precio del PCM en la localización de este óptimo se analiza más adelante. En la figura 19 se observa que su efecto sobre esta posición es leve, para el rango de precios considerado $[0,6, \infty) \text{ €/kg}$.

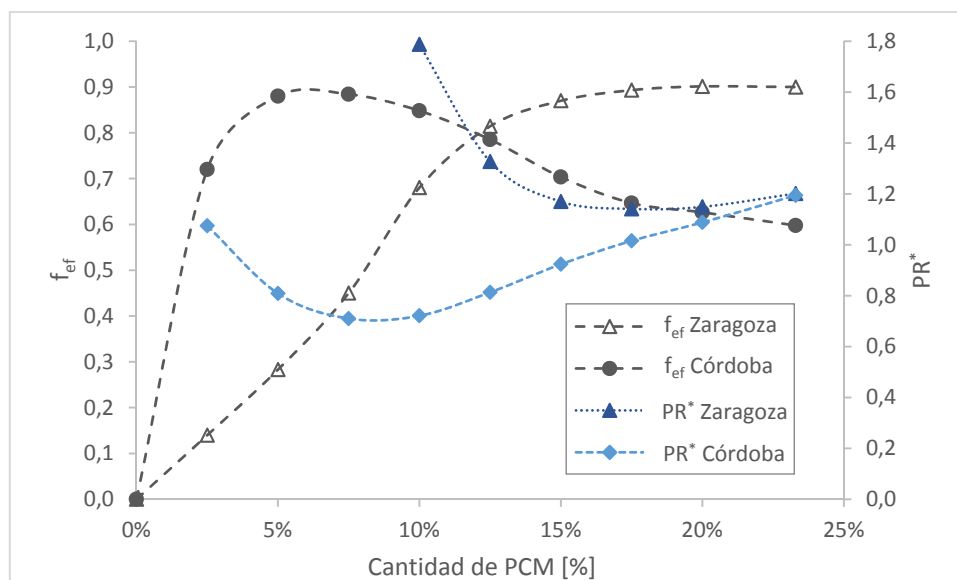


Fig. 7. 19. Representación de la eficacia del uso de la capacidad adicional de almacenamiento (f_{ef}) y del número adimensional relacionado con el periodo de retorno (PR^*) en función de la cantidad de PCM.

Además, en la figura (fig. 7.19) se observa la cercanía entre el punto óptimo económico y los valores máximos de la eficacia de la capacidad de almacenamiento. Este hecho no es casual; es preciso notar que, si se asume una relación prácticamente lineal entre la masa de PCM integrado en el sistema y la cantidad máxima de energía que es capaz de almacenar y liberar (*vid.* fig. 7.18), existe una relación directa entre el factor de eficacia propuesto en este apartado y la inversa del periodo de retorno definido -a partir de las simplificaciones adicionales expuestas en la sección 7.4.2.1a- en la ecuación 14. Por otro lado, si se atiende a la forma de las curvas que representan la variación del periodo de retorno con la cantidad de PCM (Ec. 14), se puede concluir que, desde el punto de vista de la seguridad en la inversión, resulta conveniente sobredimensionar ligeramente ($x_{PCM} > x_{PCM,op}$) con respecto al punto óptimo ($x_{PCM,op}$) la capacidad de almacenamiento.

$$\left. \frac{\partial PR^*}{\partial x_{PCM}} \right|_{x_{PCM} > x_{PCM,op}} < \left. \frac{\partial PR^*}{\partial x_{PCM}} \right|_{x_{PCM} < x_{PCM,op}} \quad Ec. 14$$

Finalmente, con el objetivo de obtener un orden de magnitud acerca del precio del PCM que rentabiliza esta aplicación, se muestra en la figura 7.21 la evolución del periodo de retorno con dicho coste, para ambas localizaciones en el punto de diseño que optimiza la inversión. Debido a que el precio del PCM que justifica la inversión es comparable al de los áridos del mortero, ambas contribuciones se han tenido en cuenta en la evaluación de la inversión (Ec. 7). Conviene señalar que este hecho, que no se ha contemplado en la definición adimensional del periodo de retorno (Ec. 13), no tiene un efecto significativo sobre la cantidad de PCM que optimiza la inversión, tal y como se demuestra en la figura 7.19. En los cálculos que siguen a continuación se ha tomado como referencia un precio de los áridos de 0,3€/kg (Cype).

Es significativo el hecho de que, para los resultados numéricos de ambas localizaciones, la relación entre el precio del PCM y el periodo de retorno sea idéntica. Esta observación se puede explicar a partir de la similitud entre la eficacia en el uso (f_{ef}) del almacenamiento térmico en ambas simulaciones (*vid.* fig. 7.19), y de la íntima relación que existe entre este coeficiente y la expresión simplificada del periodo de retorno.

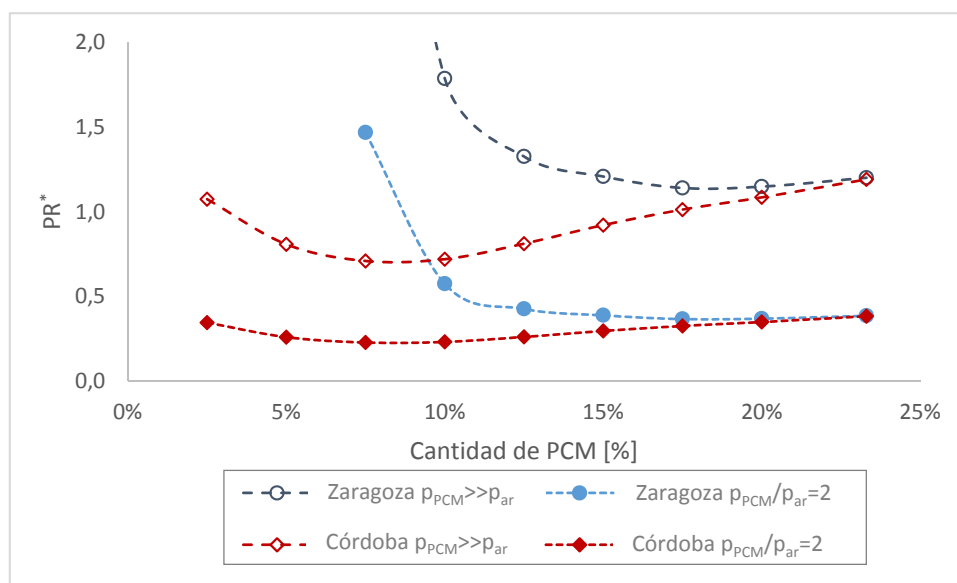


Fig. 7. 20. Influencia de la relación entre el precio del PCM (p_{PCM}) y de los áridos del mortero (p_{ar}) en la cantidad del material de almacenamiento térmico que optimiza la inversión.

Según los resultados de las simulaciones, el precio del PCM a partir del cual la inversión resulta rentable se sitúa entre 0,9 y 1€/kg. Conviene señalar que para esta evaluación sólo se ha tenido en cuenta la operación del sistema bajo la demanda de calefacción durante un periodo fijado de 120 días invernales. Tal como apuntan Ansuini et al. (2011), es esperable que la capacidad de almacenamiento latente permita lograr un cierto ahorro asociado a la minimización del sobrecalentamiento durante el periodo estival, de manera que el aprovechamiento anual del PCM aumente. Además, cuando la máquina opera proporcionando agua para refrigeración, el traslado del consumo al periodo nocturno favorece una mejora de su eficiencia, debido a que las condiciones para el intercambio de calor en el condensador son más favorables. Ambos efectos, que sería necesario estudiar con detalle en cada aplicación concreta, pueden producir una reducción apreciable, con respecto a los valores calculados, del periodo de retorno de la inversión.

Por otra parte, pese a que se ha visto que el coste de la energía eléctrica no tiene una influencia significativa en el diseño de la capacidad de almacenamiento del suelo, condiciona directamente el periodo de retorno. De esta modo, algunos cambios en el mercado eléctrico, como los incrementos en el coste de la energía (manteniendo una relación entre los precios de la tarifa con discriminación similar) o el aumento de la bonificación del consumo en el periodo valle, reducirían el periodo de retorno de la inversión de una forma prácticamente proporcional (Ec. 11).

En cualquier caso, si se ciñe el análisis al contexto económico actual y a la aplicación únicamente de calefacción, el precio actual de comercialización del PCM granulado –en torno a 6€/kg- no permite rentabilizar la incorporación del material en el sistema de suelo radiante analizado. Estos resultados reafirman la necesidad de trabajar en la búsqueda de PCM de bajo coste.

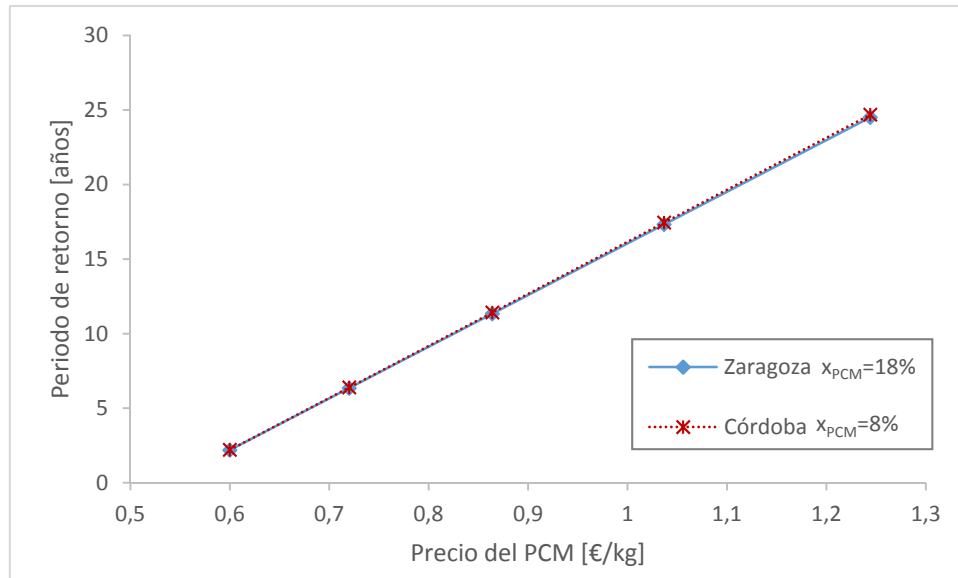


Fig. 7. 21. Dependencia del periodo de retorno de la inversión en función del precio por kilogramo de PCM a partir de los resultados de ambas simulaciones.

7.5. Análisis de sensibilidad y de propagación de incertidumbre

Finalmente, se aplica la metodología de análisis de sensibilidad y propagación de incertidumbres al cubículo experimental con suelo radiante. El objetivo en esta sección es cuantificar la manera en que las posibles desviaciones asociadas a las medidas y estimaciones teóricas de las propiedades termofísicas realizadas en esta tesis influyen en el intervalo de incertidumbre asociado a los resultados numéricos. Asimismo, el análisis de sensibilidad permite identificar las propiedades cuya desviación posee una mayor repercusión sobre dicho intervalo de error.

7.5.1. Selección del caso de estudio particular

El análisis de propagación de incertidumbres se ha particularizado para un caso de estudio concreto. Se ha considerado el funcionamiento del cubículo experimental (situado en Córdoba) durante el mes de enero. Dado que el principal interés de las simulaciones numéricas es evaluar la diferencia entre el comportamiento de un sistema con y sin PCM, se ha analizado la propagación de incertidumbres a través de dos sistemas: el suelo radiante tradicional y el que contiene un 25% de material GR27. El algoritmo de control y todas las

condiciones de la simulación se mantienen con respecto al caso analizado en las secciones anteriores.

En este caso, ha sido necesaria la reducción del incremento temporal de cálculo, tal y como se recomienda en el apartado 6.3.3.2 del capítulo 6, de manera que se minimizase el error asociado a la discretización empleada. A través del análisis de la convergencia del método numérico para modelo concreto correspondiente a la instalación experimental analizada, se ha determinado que a partir de un incremento temporal igual o inferior a 300s, los errores atribuibles a esta discretización son menores al 0,1%.

7.5.2. Descripción de la incertidumbre de las propiedades de los materiales medidas

El principal interés de este análisis es la evaluación de la influencia de las posibles desviaciones en los valores de las propiedades termofísicas determinadas de los materiales en el intervalo de incertidumbre asociado a los resultados numéricos. No obstante, al conjunto de variables aleatorias asociadas a la incertidumbre de estas propiedades, se ha añadido el posible error vinculado a la estimación, mediante correlaciones, del coeficiente de convección sobre la superficie del suelo. A raíz de la diferencia observada entre las diferentes correlaciones y medidas experimentales que han sido publicadas hasta el momento (*vid.* Capítulo 5, sección 5.3.5), se ha estimado conveniente asignar una incertidumbre de $\pm 20\%$ en torno al valor calculado según la correlación de Awbi y Hatton (1999). Se considera esta desviación constante bajo cualquier condición y tipo de sistema analizado (con y sin PCM). De esta manera, la incertidumbre asociada se puede describir matemáticamente mediante una única variable aleatoria.

Debido a que los análisis presentados en esta tesis se basan en la comparación del sistema de suelo radiante con PCM con respecto al tradicional, la definición de la relación – o correlación- entre las variables de entrada aleatorias introducidas en los modelos numéricos que representan sendos casos, es un aspecto que debe ser observado con detenimiento.

Atendiendo a esta cuestión, es previsible que las variables aleatorias que describen las desviaciones asociadas a las propiedades del material compuesto de mortero con PCM presenten una cierta correlación con las correspondientes al mortero original. En consecuencia, se ha optado por la definición de la incertidumbre de las propiedades termofísicas de los materiales compuestos a partir de los diferentes modelos que se han ajustado para describir la dependencia de dichas propiedades con el contenido en PCM del compuesto. A modo de ejemplo, se muestra en la ecuación 15 la definición de la incertidumbre asociada al valor del calor específico de un mortero con PCM a partir del modelo utilizado para su evaluación y las tres variables aleatorias independientes que representan, a su vez, las posibles desviaciones en la medida de $c_{p,m}$, $c_{p,PCM}$ y X_{PCM} .

A causa de que la incertidumbre en la medida de algunas propiedades es elevada no se considera en ningún caso el posible error asociado al propio ajuste de modelo a la descripción de la variación real de las propiedades termofísicas.

$$c_{p,m-PCM} = (1 - x_{PCM} - \delta x_{PCM}) \cdot (c_{p,m} + \delta c_{p,m}) + (x_{PCM} + \delta x_{PCM}) \cdot (c_{p,PCM} + \delta c_{p,PCM})$$

Ec. 15

En este sentido, merece especial atención el tratamiento de la desviación asignada a la conductividad térmica. A causa de la elevada incertidumbre de las medidas experimentales, se ha optado por calcular el valor de la conductividad de cada material a partir del ajuste del modelo de Maxwell (1954) a los tres valores determinados experimentalmente de los morteros con distintas composiciones ($\lambda_{0\%}$, $\lambda_{10\%}$, $\lambda_{25\%}$). Estas medidas se consideran tres variables aleatorias independientes, ya que se asume que la posible heterogeneidad del material es la fuente principal de incertidumbre en la medida proporcionada por el equipo utilizado (TCi, *vid.* capítulo 4, sección 4.5). Al igual que en otros casos, este tratamiento de la incertidumbre lleva implícita la asunción de que el modelo de Maxwell puede describir la variación real de la conductividad térmica con el contenido de PCM con una exactitud considerablemente superior a la de las medidas experimentales.

7.5.2.1. Tratamiento matemático de la incertidumbre de la curva h - T

Según el método expuesto en el capítulo 6, se han utilizado idénticos parámetros para la descripción de las desviaciones asociadas a la curva h - T ($c_{p,PCM}$, h_m , T_m y ΔT_m). Pese a que en las medidas del método T-history puede existir cierta correlación entre las desviaciones de cada uno de estos parámetros, relacionada con distintos fenómenos (p. ej. con la transferencia de calor en las muestras del método T-history o con las desviaciones en la medida de las sondas), se asumirá en este análisis que todas ellas son variables aleatorias independientes entre sí.

De este modo, la incertidumbre en la curva h - T analítica del PCM, ajustada (sección 7.2.3) a los datos experimentales del capítulo 3, se introduce, como muestra la ecuación 16, a través de su formulación matemática en términos de distintas variables adimensionales (f : fracción de líquido y $\theta = (T - T_m) / \Delta T_m$: temperatura adimensional, Ec. 16) y de los parámetros de la curva asociados a propiedades termofísicas (c_p y h_m).

$$h(T) - h(T_0) = (c_p + \delta c_p) \cdot (T - T_0) + (h_m + \delta h_m) \cdot f\left(\frac{T - T_m - \delta T_m}{\Delta T_m + \delta \Delta T_m}\right)$$

Ec. 16

Donde las variables T_m y ΔT_m , que pueden definirse con cierta arbitrariedad, se han tomado en este caso como los valores de temperaturas que cumplen las siguientes ecuaciones (Ec. 17 y 18).

$$f(T_m) = 0,5$$

Ec. 17

$$f\left(T_m + \frac{\Delta T_m}{2}\right) - f\left(T_m - \frac{\Delta T_m}{2}\right) = 0,9$$

Ec. 18

En la estimación del posible error en la medida de las temperaturas relacionadas con el cambio de fase (T_m y ΔT_m), se han tenido en cuenta los aspectos particulares de la metodología T-history que se han analizado en esta tesis (Capítulo 3, secciones 3.2 y 3.3). En primer lugar, estos parámetros están ligados a la exactitud de las sondas de temperatura ($\pm 0,15^\circ\text{C}$). Por otro lado, el gradiente térmico radial en las muestras produce una desviación máxima que, según los resultados del capítulo 3, se puede expresar mediante la siguiente ecuación (Ec. 19).

$$|\delta T_m| \leq 0,22 \cdot |T_\infty - T_m| \quad \text{Ec. 19}$$

Así pues, se tomará la mitad de este valor como el posible intervalo de variación asociado al mencionado fenómeno. Entre la estimación de este error calculado a partir de los ensayos de fusión y solidificación, se utilizará el más desfavorable.

Finalmente, debido a que el modelo no considera el leve fenómeno de histéresis observado ($0,3^\circ\text{C}$), se asumirá esta diferencia de temperaturas como una desviación adicional en la estimación de la temperatura de cambio de fase. En la tabla 7.10 se resumen los cálculos de la incertidumbre asociada a la temperatura e intervalo térmico de cambio de fase.

Fenómeno	Desviación
Exactitud de la sonda	$\delta T_{m,s} = \pm 0,15^\circ\text{C}$
Gradiente térmico radial	$\delta T_{m,Bi} = \pm 0,22 \cdot T_\infty - T_m /2 = \pm 0,35^\circ\text{C}$
Histéresis	$\delta T_{m,hist} = \pm (T_{fus} - T_{sol})/2 = \pm 0,15^\circ\text{C}$
Variable aleatoria	Desviación
δT_m	$\delta T_m = (\delta T_{m,s}^2 + \delta T_{m,Bi}^2 + \delta T_{m,hist}^2)^{1/2} = \pm 0,41^\circ\text{C}$
$\delta \Delta T_m$	$\delta \Delta T_m = 2^{-1/2} \cdot (\delta T_{m,s}^2 + \delta T_{m,Bi}^2)^{1/2} = \pm 0,54^\circ\text{C}$

Tabla 7. 10. Determinación de la incertidumbre de los parámetros de la curva h-T relacionados con el intervalo de temperaturas de cambio de fase (T_m y ΔT_m).

Por otro lado, en el caso de la medida de la entalpía de cambio de fase se tomará un $\pm 10\%$ de acuerdo con los resultados del trabajo de verificación de la instalación experimental T-history llevado a cabo por Lázaro (2008). La incertidumbre asociada a la determinación del calor específico del PCM a partir de la curva h-T se ha calculado mediante el método desarrollado en el capítulo 3 (sección 3.3).

Finalmente, en la tabla 7.11 se presenta el conjunto de variables aleatorias consideradas en el análisis de propagación de incertidumbres.

Tipo de variable de entrada	Denominación	Incert.	Medida / Estimación
Coficiente de convección	$h_{conv,s}$	$\pm 20\%$	Correlación de Awbi
Propiedades termofísicas de los materiales	ρ_m	$\pm 2\%$	EN 1015-10 (2000)
	ρ_{PCM}	$\pm 2\%$	EN 1015-10 (2000)
	$c_{p,m}$	$\pm 5\%$	TCi + medida de densidad
	$\lambda_{m,0\%PCM}$	$\pm 10\%$	TCi
	$\lambda_{m,10\%PCM}$	$\pm 10\%$	TCi
	$\lambda_{m,25\%PCM}$	$\pm 10\%$	TCi
	XPCM	$\pm 5\%$	

Curva h-T	$C_{p,PCM}$	$\pm 20\%$	T-history
	h_m	$\pm 10\%$	
	T_m	$\pm 0,41^{\circ}C$	
	ΔT_m	$\pm 0,54^{\circ}C$	

Tabla 7. 11. Listado de variables aleatorias independientes consideradas en el análisis de propagación de incertidumbres.

7.5.3. Propagación de incertidumbres

A partir de los resultados del conjunto de sesenta simulaciones correspondientes al muestreo obtenido mediante el método del Hipercubo Latino (McKay et al. 2000), se ha estimado la incertidumbre de los resultados del consumo eléctrico de la bomba de calor y de su consiguiente coste económico durante el periodo analizado. En la tabla 7.12 se resume la información extraída a partir de las simulaciones. Se ha calculado el rango de incertidumbre asociado al nivel de confianza de 97,5%.

Sistema	Suelo radiante convencional	25% GR27
Consumo eléctrico diario promedio total [W·h/(m ² ·d)]	251±3 (±1,1%)	262±2 (±0,9%)
Consumo eléctrico diario periodo valle [W·h/(m ² ·d)]	210±2 (±0,8%)	257±2 (±0,8%)
Consumo eléctrico diario periodo punta [W·h/(m ² ·d)]	41±1 (±3,2%)	5±2 (±39,0%)
Coste de la energía eléctrica consumida (1 de enero-30 de enero) [€/m ²]	0,647±0,009 (±1,5%)	0,506±0,010 (±2,0%)
Ahorro en el coste de la energía eléctrica consumida (1 de enero-30 de enero) [€/m ²]	-	0,113±0,014 (±12,1%)

Tabla 7. 12. Resumen de los resultados e incertidumbres asociadas durante el periodo de cálculo (1 de enero-31 de enero, Córdoba).

Las desviaciones consideradas en este análisis producen errores relativamente pequeños en el cálculo del consumo de energía, menores en general al 3%. Sin embargo, la incertidumbre relativa del ahorro en el coste de la energía obtenido por la incorporación de PCM en el suelo radiante se amplifica hasta el $\pm 12\%$.

Debido a que esta cuantificación de la mejora introducida por el material de almacenamiento tiene una repercusión directa sobre el análisis de la inversión, el análisis de sensibilidad que se presenta a continuación se ha centrado en esta variable.

7.5.4. Análisis de sensibilidad

En la figura 7.22 se representa gráficamente la sensibilidad de la incertidumbre de los resultados relacionados con el coste de la energía eléctrica de los dos casos analizados frente a las desviaciones consideradas en los parámetros de entrada del modelo. El coeficiente de regresión es elevado ($>0,98$ en todos los casos), por lo que queda justificado el análisis mediante los coeficientes normalizados de regresión (SRC).

En el caso del sistema de suelo radiante sin PCM se observa que el incremento diferencial de la masa térmica no produce una reducción del coste de la energía eléctrica. En esta simulación, las incertidumbres asociadas al cálculo del coeficiente de convección

sobre la superficie del suelo, en primer término, y a la medida de la conductividad, poseen la mayor repercusión sobre la desviación de los resultados. Por otro lado, en los resultados correspondientes al sistema con PCM, se observa la preponderancia de las variables relacionadas con la curva h-T, en particular la temperatura y entalpía de cambio de fase.

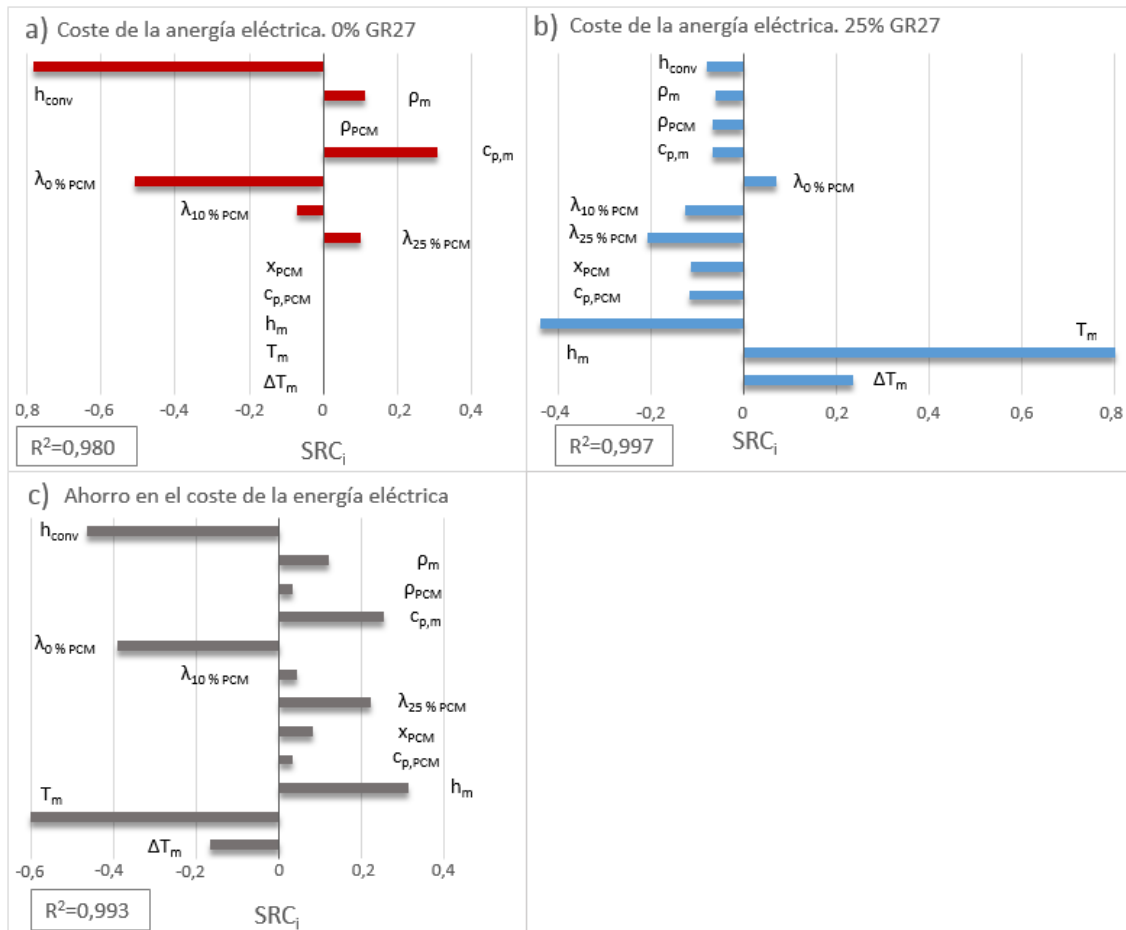


Fig. 7. 22. Cuantificación de la sensibilidad (SRC) del coste y el ahorro en la energía eléctrica consumida.

A partir de la información que proporcionan los mencionados coeficientes, y una vez comprobado el comportamiento lineal de las desviaciones en torno las soluciones de los casos básicos, se puede aplicar el método propuesto en el capítulo 6 (sección 6.5) que permite la determinación de una combinación de niveles de incertidumbre que reduce la desviación de los resultados hasta cierto nivel fijado. En este capítulo se aplica el método para la determinación de la exactitud necesaria en las medidas de las propiedades de los materiales. Por el contrario, no se considera realista, sin realizar medidas experimentales específicas, mejorar la incertidumbre asociada al cálculo del coeficiente de convección. De esta forma, a causa de la elevada sensibilidad de la incertidumbre del ahorro económico frente a este error, la mejora de la exactitud de la predicción de los resultados teóricos es limitada. Así pues, teniendo este factor condicionante en cuenta, se presenta la combinación

de exactitudes requeridas para las variables de entrada que permite reducir la desviación en el cálculo del ahorro económico hasta un 8%.

	Denominación	Incertidumbre original	Medida	Incertidumbre objetivo
Propiedades termofísicas de los materiales	ρ_m	$\pm 2\%$	EN 1015-10	$\pm 2\%$
	ρ_{PCM}	$\pm 2\%$	EN 1015-10	$\pm 2\%$
	$c_{p,m}$	$\pm 5\%$	TCi+p	$\pm 5\%$
	$\lambda_{m,i\%PCM}$	$\pm 10\%$	TCi	$\pm 4\%$
	XPCM	$\pm 5\%$		$\pm 5\%$
Curva h-T	$c_{p,PCM}$	$\pm 20\%$	T-history	$\pm 20\%$
	h_m	$\pm 10\%$		$\pm 7\%$
	T_m	$\pm 0,41^\circ\text{C}$		$\pm 0,14^\circ\text{C}$
	ΔT_m	$\pm 0,54^\circ\text{C}$		$\pm 0,54^\circ\text{C}$
Ahorro económico		$\pm 12\%$		$\pm 8\%$

Tabla 7. 13. Presentación y comparación con los errores asociados a las medidas realizadas en esta tesis de la combinación de incertidumbres que permite reducir la desviación en el cálculo del ahorro económico hasta un $\pm 8\%$.

La cuantificación presentada en la tabla 7.13 del nivel de exactitud deseable para las medidas de las propiedades termofísicas del compuesto de mortero y PCM, muestra la necesidad de mejorar algunas de las medidas de esta tesis. En primer lugar, si se atiende a los parámetros identificados que describen la curva h-T, destaca principalmente la mejora requerida en la temperatura de cambio de fase. Este nivel de incertidumbre haría necesario, teniendo en cuenta las curvas h-T medidas del material GR27, la consideración del fenómeno de histéresis en el modelo numérico. Además, si se utiliza el método T-history para la determinación de la curva h-T, se debería considerar la mejora de la exactitud de la medida de las sondas y la manera en que se pueda garantizar que la perturbación que introducen sobre este parámetro los gradientes térmicos radiales en la muestra es inferior al valor que indica la tabla 7.13 ($0,14^\circ\text{C}$). Por otro lado, la exactitud requerida para la entalpía de cambio de fase ($\pm 7\%$), está dentro de un nivel asequible para el método.

Finalmente, la elevada exactitud necesaria para el valor de la conductividad térmica ($\pm 4\%$), haría necesaria la utilización de un método de medida específico para materiales de construcción compuestos como los dispositivos de placa caliente guardada.

7.6. Conclusiones del capítulo

En este capítulo se ha realizado un estudio numérico del comportamiento del sistema de suelo radiante propuesto en una instalación experimental. El análisis se ha particularizado para la aplicación en la que el suelo radiante se acopla a una bomba de calor. En ella se trata de obtener una reducción del coste de la energía eléctrica empleada en calefacción a través del desplazamiento del consumo de la bomba de calor a las horas valle.

Los resultados numéricos han mostrado la capacidad del sistema de suelo radiante para desplazar una parte importante de la demanda energética de calefacción. En concreto, cuando funciona bajo el sistema de control propuesto, el suelo radiante con PCM puede almacenar y liberar, a través de la fluctuación diaria de temperaturas propia de la aplicación,

aproximadamente el doble de energía térmica que un elemento de suelo radiante tradicional. Esta capacidad de almacenamiento adicional permite trasladar, en comparación con el sistema convencional operando bajo las mismas circunstancias, aproximadamente $150\text{W}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ de consumo de energía térmica desde el periodo de demanda punta al tramo horario valle.

Por otro lado, la inclusión de PCM no tiene un efecto significativo en el consumo de energía. De este modo, en el caso analizado en este capítulo, el aprovechamiento de la capacidad de almacenamiento de energía del PCM en el sistema de suelo radiante supone un ahorro en el coste de la energía eléctrica consumida de en torno al 15%. Es preciso señalar que este beneficio logrado a partir de la gestión de la energía térmica que se suministra al elemento termoactivo, se alcanza a través de una cierta fluctuación diaria de la temperatura del ambiente interior (20-25°C).

El estudio del comportamiento del sistema durante un periodo invernal amplio (noviembre-febrero) ha mostrado los aspectos negativos del sistema de control propuesto. Si la demanda de calefacción decae durante las horas centrales del día, la energía térmica almacenada en el sistema provoca un sobrecalentamiento de la temperatura del ambiente interior. Este fenómeno está relacionado con una de las principales características de los elementos termoactivos. En ellos, así como la alimentación de energía térmica se realiza de forma activa y controlable, el suministro efectivo de esta energía para calefacción o refrigeración está sujeto a otros fenómenos, como la propia dinámica del elemento o el gradiente térmico entre la superficie y el ambiente interior, que imposibilitan la realización de una acción de control directa sobre esta potencia. Este efecto negativo observado en los resultados numéricos, que se ha mostrado especialmente significativo en las simulaciones realizadas a partir de los datos climáticos disponibles de Córdoba, pone de manifiesto la necesidad de implementar algoritmos de control en los que el proceso de carga del elemento se realice en base a la predicción de la demanda del día siguiente.

Se ha analizado, también, el efecto de los principales parámetros de diseño del sistema de suelo radiante propuesto: tipo de PCM, cantidad de PCM y separación entre tubos. Entre los materiales analizados, se ha seleccionado el compuesto granulado GR27. Se ha mostrado cómo la fluctuación diaria de la temperatura abarca el rango asociado a su proceso de cambio de fase, de manera que se obtiene un buen aprovechamiento de su capacidad de almacenamiento térmico. En cambio, la utilización de materiales con una temperatura de cambio de fase superior –GR31 y GR42– exige la utilización de una temperatura del agua más alta. Al mismo tiempo, el aprovechamiento de la energía térmica asociada al cambio de fase es menor con estos materiales.

Se ha propuesto en este capítulo la reducción del paso entre tubos con el objetivo de compensar el efecto negativo, asociado a la reducción de la conductividad térmica efectiva del mortero, de la incorporación de PCM en la emisión térmica del suelo radiante. Los resultados han mostrado que esta alternativa de diseño permite obtener mayores ahorros en el funcionamiento del sistema cuando se emplean cantidades elevadas de PCM. Sin embargo, si se analiza la inversión, el ahorro que se obtiene no justifica el sobre coste en materiales relacionado con el aumento de la longitud de tubería instalada.

De este modo, una vez seleccionado el PCM, de acuerdo a la adecuación del rango de temperaturas asociado al cambio de fase, y descartada la alternativa de la modificación de la separación entre tubos, el principal parámetro de diseño que se debe ajustar a la demanda térmica de cada aplicación concreta es la cantidad de PCM. El porcentaje másico de PCM influye principalmente en la cantidad de energía que es posible trasladar a las horas valle de la demanda eléctrica. En este capítulo, se propone la determinación de la cantidad de PCM que minimiza el periodo de retorno de la inversión. Se puede demostrar matemáticamente que, si se asume que la cantidad de PCM no tiene una influencia relevante en el total de la energía consumida por el sistema, la cantidad del material que minimiza este periodo de retorno no depende de los precios de la energía eléctrica. Asimismo, si se acepta que el precio del PCM es considerablemente superior al de los áridos empleados en construcción, este punto óptimo tampoco depende del precio del PCM. De este modo se puede asumir, en una primera aproximación, que el diseño óptimo depende únicamente de la relación de cantidad de PCM incluida en el sistema y de la energía que es capaz de desplazar desde el periodo punta.

De forma paralela, se ha definido un factor que hace referencia a la eficacia mediante la cual la capacidad adicional de almacenamiento de energía introducida por el PCM es capaz de evitar el consumo de energía térmica durante el periodo punta. Aproximadamente un 90% del incremento de esta capacidad asociado a la incorporación de PCM se emplea, en los casos más favorables, en trasladar el consumo de energía a las horas valle de demanda eléctrica. Además, los puntos con un mayor aprovechamiento de esta capacidad coinciden con los óptimos de la inversión.

A partir de la caracterización obtenida del consumo energético de los sistemas propuestos se ha analizado la influencia del precio del PCM en la inversión. Los resultados del estudio muestran que el precio del material que hace viable la inversión debería estar en torno a 0,9-1€/kg. Este resultado confirma la necesidad de trabajar en la búsqueda y obtención de PCM de bajo coste.

Por último, se ha realizado un análisis de sensibilidad y de propagación de incertidumbre a los resultados numéricos con el objetivo de evaluar la repercusión en la exactitud de los mismos de las posibles desviaciones en las medidas de las propiedades termofísicas de los materiales de mortero y PCM realizadas en esta tesis. Estos errores tienen una principal influencia en términos relativos en el cálculo del ahorro del coste de la electricidad ($\pm 12\%$). El análisis de sensibilidad ha permitido identificar las propiedades cuya desviación es más crítica y que, en consecuencia, debería ser mejorada. Las exactitudes correspondientes a la temperatura de cambio de fase y a la conductividad térmica deberían ser mejoradas hasta $\pm 0,15^\circ\text{C}$ y $\pm 4\%$, respectivamente, para lograr una reducción del error en los cálculos numéricos hasta el $\pm 8\%$. En el caso de la curva h-T, este requerimiento implica en primer lugar, para el PCM analizado (GR27), la necesidad de considerar la histéresis en el modelo de simulación. Por otro lado, dentro del ámbito del trabajo experimental relacionado con el T-history, dicha exactitud exige profundizar en la eliminación o minimización de los errores asociados al gradiente de temperatura radial en las muestras.

Conclusiones

La investigación llevada a cabo en esta tesis ha puesto de manifiesto la importancia del trabajo relacionado con la simulación numérica y la determinación de propiedades en el desarrollo de elementos de construcción termoactivos con PCM. Se ha partido de una revisión de los trabajos de investigación dedicados al estudio de estos componentes y a la preparación de materiales de construcción con PCM, así como de las patentes publicadas en relación a estos sistemas. La tesis se ha dividido en dos bloques principales, el primero dedicado a la determinación de esas propiedades y el segundo a la simulación numérica. Además, se ha propuesto la aplicación del análisis de sensibilidad y propagación de incertidumbre con el objetivo de considerar en el trabajo de simulación los posibles errores asociados a la medida de las propiedades de los materiales. A continuación, se recogen las principales conclusiones derivadas del trabajo desarrollado en esta tesis doctoral.

Revisión del estado del arte

Se ha llevado a cabo una revisión del estado del arte sobre los principales aspectos relacionados con la incorporación de PCM en elementos de construcción activos, que ha comprendido los siguientes puntos:

- Análisis exhaustivo de los trabajos numéricos y experimentales, presentados hasta el momento, que se han ocupado de estos sistemas
- Recopilación y revisión de patentes que describen dispositivos o sistemas de construcción activos con PCM
- Recopilación de los materiales disponibles para su integración en la edificación
- Modelos numéricos para la simulación de los PCM dentro de los edificios

El análisis de los trabajos realizados por otros investigadores ha iluminado ciertos aspectos de interés que se han establecido como los objetivos de esta tesis doctoral. Asimismo, la información recopilada sobre los tipos de sistemas, alternativas de diseño y familias de materiales disponibles ha sido agrupada en una tabla, en la que se analizan estos aspectos y diversos factores que intervienen en el diseño de los elementos termoactivos con PCM.

Atendiendo a estos criterios, se ha realizado un pre-diseño del sistema de suelo radiante con PCM. Se ha optado por la incorporación del PCM, impregnado en un material poroso suministrado en forma de gránulos (Rubitherm GR), en la capa de recrecido de mortero tradicionalmente utilizada en los sistemas de suelo radiante tipo A (según la norma EN 1264-1). A priori, el sistema presenta las siguientes ventajas: implica un bajo coste de inversión en relación a los elementos tradicionales y permite la incorporación de una importante cantidad de PCM. Además, pese a que el PCM reduce la conductividad térmica del material, el sistema propuesto no presenta resistencias térmicas adicionales.

Determinación de propiedades

Dentro del trabajo relacionado con la medida de la curva h-T mediante el método T-history, se ha profundizado en el estudio teórico de algunas de las principales fuentes de error reconocidas por los investigadores. En este sentido, se ha analizado la influencia de los gradientes térmicos radiales en el interior de muestras sólidas en las desviaciones que produce el método.

Los resultados han revelado que para los valores límite del número de Biot generalmente aceptados, los errores en la estimación de entalpía de cambio de fase son cercanos al 10%, si se mide la temperatura en el centro de las muestras. En cambio, las desviaciones en la medida del calor específico son menores, no superan en ningún caso el 5%.

A partir del análisis adimensional ha sido posible la síntesis de correlaciones que permiten calcular de manera precisa las desviaciones en la medida del calor específico y la entalpía de cambio de fase atribuidas a la conducción radial del calor en las muestras. Del mismo modo, se han establecido ciertos límites que permiten acotar el error en la estimación de la temperatura de cambio de fase. En la aplicación del método a la caracterización de materiales sólidos con PCM llevada a cabo en esta tesis, se han utilizado estas correlaciones para la corrección de los resultados obtenidos a partir del tratamiento directo de los datos experimentales.

Por otro lado, se han desarrollado fórmulas para calcular la propagación de incertidumbres asociada a las desviaciones en la medida de las sondas de temperatura utilizadas en el método T-history a través del algoritmo de integración propuesto por Marín et al. (2003) de las medidas experimentales que permite la determinación de la curva h-T. Estas fórmulas complementan a las proporcionadas por Zhang et al. (1999) y Rady et al. (2009), pues permiten asignar un intervalo de incertidumbre al incremento de entalpía correspondiente a cada punto de la curva.

Si se comparan los efectos de ambas fuentes de error, se observa cómo los errores máximos asociados a la falta de uniformidad en la temperatura en las muestras son considerablemente inferiores a los producidos por las posibles desviaciones de la medida de las sondas (hasta el 20%). Sin embargo, en el caso de la medida de la variación de entalpía asociada al cambio de fase, si la temperatura de las muestras se mide en el centro, el efecto de la conducción del calor en experimentos con un número de Biot cercano al límite ($Bi = h \cdot R / (2 \cdot \lambda) \approx 0,1$) cobra mayor importancia frente al relacionado con el error de medida de las sondas.

Por este motivo se concluye que, para la caracterización de materiales sólidos con PCM, resulta irrelevante tener en cuenta el efecto del número de Biot de los ensayos en la medida del calor específico. En cambio, si se mide la temperatura en el centro, conviene aplicar estas correcciones si se desea mejorar la estimación de la entalpía de cambio de fase.

Por otra parte, los valores del incremento de entalpía corregidos mediante las fórmulas teóricas desarrolladas han sido comparados con medidas realizadas a partir de la cuantificación del balance de energía a una corriente de aire que intercambia con un lecho de partículas de los materiales analizados. Las diferencias observadas entre estas curvas

corregidas y los valores determinados mediante este método complementario, así como los proporcionados por Rady et al. (2009), se ajustan razonablemente. Las diferencias entre las medidas realizadas están comprendidas dentro del rango de incertidumbre asociado a sendas metodologías.

A partir del método T-history se han determinado las curvas h-T de los materiales inicialmente seleccionados para la aplicación de suelo radiante: PX y GR27, 31 y 42 (Rubitherm). Los ensayos de fusión y solidificación realizados sobre los materiales seleccionados han mostrado un buen comportamiento de los mismos: por una parte, no se observan fenómenos de subenfriamiento y la histéresis es muy leve y, por otra parte, no se ha apreciado degradación tras veinte ciclos de solidificación y fusión. Sin embargo, en la familia de materiales PX se ha observado una compactación que se ha asociado al fugado del material, de modo que este conjunto de compuestos se ha descartado para su inclusión en el sistema de suelo radiante.

Se han preparado muestras de mortero con PCM granulado (GR27) en distintas proporciones máxicas (10 y 25% en masa sobre los componentes secos). A partir de éstas, se han realizado medidas de la densidad, conductividad térmica, efusividad y difusividad térmica. Los resultados experimentales han permitido el ajuste a modelos sencillos para describir la variación de estas propiedades con el contenido en PCM. Estas fórmulas teóricas se han utilizado en las simulaciones que se han presentado en el capítulo 7. Además, se ha evaluado la incertidumbre asociada a las medidas de los equipos y dispositivos experimentales utilizados.

Por último, gracias a la colaboración del Laboratorio del Fuego de la Escuela Politécnica de la Edificación de Barcelona (Universidad Politécnica de Cataluña), llevada a cabo dentro del contexto del proyecto del Plan Nacional (ENE2011-28269-C03-01), se ha realizado una primera evaluación del comportamiento de los morteros con PCM frente al fuego. Pese a que los resultados de los ensayos han mostrado una degradación de esta característica con respecto a la del mortero convencional se considera que estos materiales, con las debidas protecciones, podrían ser integrados dentro del edificio.

Desarrollo de herramientas de simulación

La herramienta de simulación para el cálculo de forma integrada con el resto de elementos del edificio del suelo radiante con PCM ha sido desarrollada dentro del entorno del programa de resolución de ecuaciones EES (Klein 2013).

El modelo permite la simulación de una o pocas zonas del edificio con una geometría sencilla. Sin embargo, los principales mecanismos de transferencia de calor que intervienen en el comportamiento térmico del edificio se calculan con un nivel de detalle acorde a los programas que actualmente se utilizan para la simulación energética de edificios.

Los resultados de esta herramienta de cálculo han sido contrastados con los de otros programas de simulación de edificios mediante la aplicación de la metodología BESTEST (Judkoff y Neymark 1995). La comparativa ha sido satisfactoria. Las diferencias, con respecto a EnergyPlus, entre las soluciones de los casos base, así como en la sensibilidad

frente a la activación de los distintos mecanismos de transferencia de calor en el edificio, han sido siempre inferiores al 5%.

Dentro del ámbito específico de la simulación del sistema de suelo radiante con PCM se han utilizado tres modelos con diferente nivel de complejidad. Teniendo en cuenta su integración dentro del modelo del edificio completo, es necesario llegar a un compromiso en la precisión y complejidad de estas herramientas de cálculo particulares. Por ello, se ha planteado la aproximación al fenómeno de transferencia bidimensional en el elemento haciendo uso de distintos niveles de precisión en la descripción de la geometría. Las aproximaciones numéricas utilizadas son las siguientes:

- Modelo 2D detallado, implementado mediante el esquema de volúmenes finitos de Fluent
- Modelo 2D simplificado, basado en un esquema de diferencias finitas que utiliza una malla ortogonal
- Modelo 1D modificado mediante la adaptación propuesta por Koschenz y Lehmann (2000)

La comparación entre los modelos ha puesto de manifiesto que la utilización de una malla ortogonal proporciona una aproximación exacta a los resultados obtenidos, tanto en régimen estacionario como dinámico, por una herramienta de simulación más detallada. Por otro lado, en base a las comprobaciones realizadas, se ha concluido que el modelo unidimensional proporciona una aproximación de exactitud suficiente para el comportamiento dinámico de los sistemas de suelo radiante propuestos. Adicionalmente, se ha planteado un criterio sencillo para analizar el rango de validez de este modelo unidimensional, basado en el cálculo de la energía almacenada (con respecto a la situación de equilibrio térmico con el ambiente interior) en régimen nominal. Siguiendo este criterio, se ha concluido que para el sistema de suelo radiante analizado, cuando contiene una cantidad máxima de PCM (25%), el límite superior para la separación entre tubos es de 150mm.

Análisis de sensibilidad y propagación de incertidumbres

Además, se ha aplicado el análisis de sensibilidad y propagación de incertidumbres al estudio de la influencia de las posibles desviaciones en la medida de las propiedades termofísicas del PCM en los resultados numéricos. En el capítulo 6 se ha aplicado la metodología, basada en los métodos Montecarlo, a un ejemplo en el que el PCM está integrado dentro de los cerramientos, operando de forma pasiva.

Si se considera el cálculo del ahorro energético que se logra mediante la incorporación de PCM, los posibles errores en las propiedades termofísicas producen unas desviaciones de hasta el 10% para este caso concreto.

Finalmente, a partir del análisis de sensibilidad, se ha propuesto un método sencillo para calcular un conjunto de valores para las desviaciones máximas de las propiedades del PCM que permite alcanzar un cierto nivel de exactitud en los resultados. En el caso analizado, los niveles de exactitud requeridos para algunas propiedades (como la

temperatura de cambio de fase) son superiores a los recomendados en trabajos previos (Mehling et al. 2006, Günther et al. 2009, Rathgeber et al. 2014) o fijados por la asociación RAL-PCM. Dado que estos niveles de incertidumbre se asocian a la sensibilidad de cada sistema físico con respecto a cada variable, se recomienda la aplicación de estos análisis cuando se desee seleccionar la metodología más adecuada para la determinación de las propiedades de los materiales.

Análisis del comportamiento térmico de un suelo radiante con PCM

Por último, en el capítulo 7 se realiza, a partir de las herramientas de simulación desarrolladas, un estudio numérico del comportamiento del sistema propuesto de suelo radiante instalado en un cubículo experimental. Se ha analizado el comportamiento del sistema cuando se emplea en calefacción y se alimenta por una bomba de calor agua-aire. En el caso de estudio seleccionado se aprovecha la capacidad de almacenamiento del suelo para desplazar el consumo de energía eléctrica desde el periodo punta de demanda eléctrica a las horas nocturnas, obteniendo de esta manera un ahorro económico.

De esta forma, se ha utilizado el modelo numérico para el diseño de la instalación experimental con suelo radiante desarrollada dentro del marco del proyecto en colaboración con la empresa CIAT. Mediante el análisis de los resultados obtenidos a partir de la herramienta de cálculo, se han extraído las siguientes conclusiones:

- Los resultados numéricos han mostrado, principalmente, la capacidad del suelo radiante con PCM para trasladar a las horas de baja demanda eléctrica una cantidad de energía notablemente superior a la de un sistema tradicional que opera bajo el mismo sistema de control. Con los materiales analizados, la incorporación de PCM pudo evitar, en un día, el consumo durante el periodo de demanda punta de aproximadamente $150\text{W}\cdot\text{h}/\text{m}^2$. Los procesos de almacenamiento y liberación de energía térmica tienen lugar a través de una cierta fluctuación de la temperatura del ambiente interior.
- Por otro lado, el sistema de control propuesto, en el que el proceso de carga se realiza sin tener en cuenta una estimación de la demanda del día siguiente, provoca un sobrecalentamiento de la zona interior si decaen lo suficiente ($<14\text{W}/\text{m}^2$) las necesidades de calefacción. Los aspectos relacionados con el control del suministro y carga de estos elementos, así como su repercusión en la fluctuación de la temperatura del ambiente interior, deben ser estudiados con mayor profundidad. En primer lugar, los resultados obtenidos señalan la necesidad de controlar el sistema bajo una predicción de la demanda y, en segundo lugar, debe ser ajustado el sistema de control para llegar a un compromiso entre una fluctuación diaria de la temperatura aceptable y el beneficio que se pretenda obtener a partir de la gestión del consumo energético del sistema de suelo radiante.
- El estudio comparativo ha permitido seleccionar, entre los materiales analizados, el PCM GR27, cuya curva h-T se ajusta mejor a la fluctuación térmica

diaria propia del funcionamiento del suelo radiante en la instalación experimental.

- Por otro lado, se ha estudiado el efecto de contrarrestar la reducción de la conductividad térmica del mortero causada por la adición de PCM mediante el ajuste de la separación entre tubos. Pese a que, para las composiciones de mortero con mayor contenido en este material, la colocación de los tubos con una menor separación produce una mejora en el ahorro económico obtenido, ésta es leve y no justifica el sobre coste vinculado a la longitud de conducto instalada en el suelo radiante.
- Se ha estudiado la influencia en el comportamiento del suelo radiante de dicho contenido en el material de almacenamiento. El aumento de esta proporción permite progresivamente trasladar el consumo de una mayor cantidad de energía al periodo nocturno. Sin embargo, la inclusión de PCM no tiene un efecto significativo en el consumo energético total.
- Así pues, si se asume que el consumo total es independiente de la cantidad de PCM, el nivel de precios de la electricidad no afecta al porcentaje de material que minimiza el periodo de retorno de la inversión. Además, si el precio del PCM es muy superior al de los áridos del mortero, dicha cantidad óptima tampoco depende del precio del material incorporado.
- A partir de los resultados numéricos correspondientes a sistemas con una capacidad de almacenamiento térmico optimizada, obtenidos durante una temporada invernal, se ha evaluado el precio de PCM que hace rentable la inversión. Según este análisis, el precio del PCM no debería ser superior a 0,9-1€/kg, de tal manera que el sobre coste empleado en su incorporación se recupere en menos de diez años. Estos resultados confirman la necesidad de continuar el trabajo relacionado con la búsqueda y análisis de PCM de bajo coste.

Difusión de resultados

Parte del trabajo y de los resultados obtenidos han sido difundidos en revistas y congresos científicos internacionales.

En relación con la determinación propiedades y análisis de características de materiales compuestos con PCM, se han presentado en congreso internacional:

Mazo J., Delgado M., Lázaro A., Dolado P., Peñalosa C., Marín J. M., Zalba B. 2015. "Analysis on the influence of thermal gradients inside T-history samples on the method accuracy: theoretical approach", *IEA ECES Greenstock. The 13th International Conference on Energy Storage*, Pekín (China).

Asimismo, dos artículos han sido publicados en revistas científicas internacionales dentro de esta temática:

- Haurie L., Mazo J., Delgado M., Zalba B. 2014. "Fire behaviour of a mortar with different mass fractions of phase change materials for use in radiant floor systems", *Energy and Buildings*, 84, pp. 86-93.
- Mazo J., Delgado M., Lázaro A., Dolado P., Peñalosa C., Marín J. M., Zalba B. 2015. "A theoretical study on the accuracy of the T-history method for enthalpy-temperature curve measurement: analysis of the influence of thermal gradients inside T-history samples", publicación aceptada el 29 de septiembre de 2015 en la revista *Measurement Science and Technology*.

Por otro lado, el trabajo realizado relacionado con la aplicación del análisis de sensibilidad y propagación de incertidumbres ha sido presentado en dos artículos de investigación. En el primero se aplica la metodología a la validación empírica de modelos, mientras que en el segundo se lleva a cabo un análisis teórico de la repercusión de las desviaciones en las medidas de las propiedades de los PCM sobre los resultados numéricos obtenidos a partir de modelos de simulación de edificios:

- Dolado P., Mazo J., Lázaro A., Marín J. M., Zalba B. 2012. "Experimental validation of a theoretical model: Uncertainty propagation analysis to a PCM-air thermal energy storage unit", *Energy and Buildings*, 45, pp. 124-131.
- Mazo J., El Badry A. T., Carreras J., Delgado M., Boer D., Zalba B. 2015. "Uncertainty propagation and sensitivity analysis of thermo-physical properties of phase change materials (PCM) in the energy demand calculations of a test cell with passive latent heat storage", *Applied Thermal Engineering*, 90, pp. 596-608.

Finalmente, los resultados numéricos de la evaluación del funcionamiento del sistema de suelo radiante con PCM han dado lugar a la elaboración de los siguientes trabajos -artículo y comunicación en congreso internacional, respectivamente-:

- Mazo J., Delgado M., Marín J. M., Zalba B. 2012. "Modeling a radiant floor system with Phase Change Material (PCM) integrated into a building simulation tool: Analysis of a case study of a floor heating system coupled to a heat pump", *Energy and Buildings*, 47, pp. 458-466.
- Mazo, J., M. Delgado, B. Zalba y J. M. Marín, "Analysis of a floor heating system with PCM coupled to a heat pump. Study of its technical and economic feasibility", *IEA ECES Innostock. The 13th International Conference on Energy Storage*, Lleida (España).

Líneas de trabajo futuro

Tanto el trabajo relativo a la determinación de propiedades de materiales compuestos de construcción con PCM, como los análisis de sensibilidad y propagación de incertidumbres a través de los modelos numéricos, han aportado datos relevantes que permiten jerarquizar las prioridades de trabajo en este campo de investigación.

Teniendo en cuenta estos resultados se proponen las siguientes líneas de trabajo:

- Continuación de la aplicación del método T-history para la determinación de la curva h-T de compuestos de mortero. En esta adaptación se tienen en cuenta los aspectos críticos del método relacionados con el compromiso entre representatividad de la muestra del material compuesto y las dimensiones máximas condicionadas por la transferencia de calor
- Determinación de la conductividad térmica de los materiales de mortero analizados mediante un método de medida específico para materiales de construcción (p.ej. placa caliente guardada)

Por otro lado, existen características de estos materiales compuestos que son críticas en la viabilidad técnica del sistema de suelo radiante propuesto:

- Análisis del posible proceso de difusión del PCM a través de la matriz de mortero y estudio de la repercusión en la aplicación concreta de suelo radiante (p.ej. compatibilidad con el resto de materiales)
- Ensayo del sistema completo de suelo radiante (placa de mortero y recubrimiento superficial) bajo los experimentos normalizados que permiten la clasificación del conjunto de materiales
- Evaluación de la resistencia mecánica a compresión y a la flexión de los morteros utilizados y estudio de las mejoras necesarias que permiten al material alcanzar los requerimientos exigidos por la normas europeas como la específica sobre suelos radiantes NF DTU 65.14 (2006) y la dedicada a capas de recrido de mortero en este tipo de sistemas DIN 18560-2 (2009)

Asimismo, dentro del ámbito de la simulación de elementos activos, se considera que tiene especial interés la continuación del trabajo en las siguientes líneas:

- El estudio sistemático del rango de validez de los modelos unidimensionales basados en la aproximación de Koschenz y Lehmann (2000) para la simulación de elementos activos con PCM puede aportar resultados muy útiles dentro del ámbito de investigación ocupado en estos elementos activos. Hasta el momento, en los escasos estudios en los que se ha utilizado un modelo unidimensional similar, no se ha comprobado este aspecto relevante de la transferencia de calor.
- Validación con datos experimentales de los modelos desarrollados tanto para la simulación de elementos de construcción activa como para el cálculo del comportamiento de zonas de edificios. En este último caso, se deberán tener en cuenta las características particulares de la aplicación de esta metodología relacionadas con diversos aspectos (p. ej. selección de datos experimentales, componentes del modelo que se pretende validar, propagación de incertidumbre, etc.). Desde este punto de vista, resulta conveniente la utilización de datos experimentales y metodologías de análisis llevados a cabo dentro de proyectos internacionales centrados específicamente en este aspecto importante de la simulación energética.

- La intercomparación de los resultados del modelo desarrollado con los de otros programas de simulación energética de edificios, tales como la última versión del Type 399 elaborada por Dentel y Stephan (2013) o el modelo de diferencias finitas de EnergyPlus, puede resultar interesante. Teniendo en cuenta las limitaciones del modelo de EnergyPlus, la modificación propuesta por Yu et al. (2014) a través de la inclusión de una capa ficticia adicional puede proporcionar la solución que permita incluir en dicha herramienta de cálculo los efectos bidimensionales de la transferencia de calor en estos elementos.
- Se debe proseguir con el trabajo de simulación con el objetivo de evaluar el comportamiento del sistema de suelo radiante con PCM en edificios reales. Es interesante ampliar el rango de aplicaciones estudiadas (p. ej. acoplamiento de energía solar o refrigeración nocturna). Asimismo, puede ser iluminadora la comparación a través del estudio numérico de su funcionamiento en relación a los sistemas TABS. Tal como apuntaron Koschenz y Lehmann (2004), la solución técnica que incorpora PCM puede resultar ventajosa en obras de rehabilitación, en las que la intervención necesaria para activar la masa térmica de los forjados resulta más problemática.
- Por último, los modelos numéricos pueden resultar herramientas útiles en la investigación de la aplicación de métodos de control más avanzados a estos sistemas con PCM.

Referencias bibliográficas consultadas

- Agyenim F., Hewitt N., Eames P., Mervyn S. 2010. "A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS)", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, pp. 615-628.
- Ahmad M., Bontemps A., Sallée H., Quenard D. 2006. "Thermal testing and numerical simulation of a prototype cell using light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change material", *Energy and Buildings*, 38, vol. 6, pp. 673-681.
- Akander J. 2000. *The ORC Method Effective Modelling of Multilayer Building Components*, Doctoral Dissertation Division of Building Technology, Department of Building Sciences KTH-Royal Institute of Technology, Stockholm (Sweden).
- Alkan C., Sari A. 2008. "Fatty acid/poly (methyl methacrylate) (PMMA) blends as form-stable phase change materials for latent heat thermal energy storage", *Solar Energy*, 82, pp. 118-124.
- Al-Shaadi S. N., Zhai Z. 2013. "Modeling phase change materials embedded in building enclosure: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, pp. 659-673.
- Al-Shaadi S. N., Zhai Z. 2015. "A new validated TRNSYS module for simulating latent heat storage walls", *Energy and Buildings*, 109, pp. 274-290.
- Amir M., Lacroix M., Ganalis N. 1999. "Comportement thermique de dalles chauffantes électriques pour le stockage quotidien", *International Journal of Thermal Engineering*, 38, pp. 121-131.
- Ansuini R., Larghetti R., Giretti A., Lemma M. 2011. "Radiant floors integrated with PCM for indoor temperature control", *Energy and Buildings*, 43, pp. 3019-3026.
- Antonopoulos K. A., Vrachopoulos M., Tzivanidis C. 1997. "Experimental and theoretical studies of space cooling using ceiling-embedded piping", *Applied Thermal Engineering*, 17, pp. 351-367.
- Arasteh D. K., Reilly M. S., Rubin M. D. 1989. "A versatile procedure for calculating heat transfer through windows", *ASHRAE Transactions*, 95, pp. 1-24.
- Arkar C., Medved S. 2009. "Influence of accuracy of thermal property data of a phase change material on the result of a numerical model of a packed bed latent heat storage with sphere", *Thermochimica Acta*, 438, pp. 192-201.
- Aschaber J., Hiller M., Weber R. 2009. "TRNSYS17: New features of the multizone building model", *11th International IBPSA Conference*, 27-30 de julio, Glasgow (Escocia).
- Barbour J. P., Hittle D.C. 2005. "Modeling Phase Change Materials with conduction transfer functions for passive solar applications", *Journal of Solar Energy Engineering*, 128, vol. 1, pp. 58-68.
- Barrio M., Font J., López D. O., Muntasell J., Tamarit J. Ll. 1993. "Floor radiant system with heat storage by a solid-solid phase transition material", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 27, pp. 127-133.
- Barzin R., Chen J. J. J., Young B. Y., Farid M. M. 2015. "Application of PCM underfloor heating in combination with PCM wallboards for space heating using price based control system", *Applied Energy*, 148, pp. 39-48.
- Bentz D. P., Turpin R. 2007. "Potential applications of phase change materials in concrete technology", *Cement and Concrete Composites*, 29, pp. 527-532.

- Bloomfield D. P. 1999. "An overview of validation methods for energy and environmental software", *ASHRAE Transactions*, 105, vol. 2, pp. 685-693.
- Bontemps A., Ahmad M., Johannès K., Sallée H., Quenard D. 2011. "Experimental and modelling study of twin cells with latent heat storage walls", *Energy and Buildings*, 43, pp. 2456-2461.
- Borinaga-Treviño R., Pascual-Muñoz P., Castro-Fresno D., Coz-Díaz J. J. del. 2013. "Study of different grouting materials used in vertical geothermal close-loop heat exchangers", *Applied Thermal Engineering*, 50, pp. 159-167.
- Borreguero A. M., Serrano A., Garrido I., Rodríguez J. F., Carmona M. 2014. "Polymeric-SiO₂-PCMs for improving the thermal properties of gypsum applied in energy efficient buildings", *Energy Conversion and Management*, 87, pp. 138-144.
- Bruggeman DAG. 1935. "Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen substanzen", *Annalen der Physik*, 416, pp. 636-664.
- Cabeza L. F., Castell A., Barreneche C., Gracia A. de, Fernández A. I. 2011. "Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: a review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, vol. 3, pp. 1675-1695.
- Cabeza L. F., Castellón C., Nogués M., Medrano M., Leppers R., Zubillaga O. 2007. "Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings", *Energy and Buildings*, 39, pp. 113-119.
- Cabrol L., Rowley P. 2012. "Towards low carbon homes -A simulation analysis of building-integrated air-source heat pump systems", *Energy and Buildings*, 48, pp. 127-136.
- Cai Y., Hu Y., Song L., Kong Q., Yang R., Zhang Y., Chen Z., Fan W. 2007. "Preparation and flammability of high density polyethylene/paraffin/organophilic montmorillonite hybrids as a form stable phase change material", *Energy Conversion and Management*, 48, pp. 462-469.
- Cai Y., Song L., He Q., Yang D., Hu Y. 2008. "Preparation, thermal and flammability properties of a novel form-stable phase change materials based on high density polyethylene/poly (ethylene-co-vinyl acetate)/organophilic montmorillonite nanocomposites/paraffin compounds", *Energy Conversion and Management*, 49, pp. 2055-2062.
- Campbell K. R. 2011. *Phase change materials as a thermal storage device for passive houses*, (Master Thesis), Portland State University.
- Carreras J., Boer D., Guillén-Gosálbez G., Cabeza L. F., Medrano M., Jiménez L. 2015. "Multi objective optimization of thermal modelled cubicles considering the total cost and life cycle environmental impact", *Energy and Buildings*, 88, pp. 335-346.
- Castell A. 2008. *Analysis and implementation of thermal energy storage using phase change materials for cooling applications*, (Tesis doctoral), Universidad de Lérida.
- Castell A., Martorell I., Medrano M., Pérez G., Cabeza L. F. 2010. "Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling", *Energy and Buildings*, 42, pp. 534-540.
- Cha J., Seo J. Kim S. 2012. "Building materials thermal conductivity measurement and correlation with heat flow meter, laser flash analysis and TCi", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 109, pp. 295-300.
- Chan A. L. S. 2011. "Energy and environmental performance of building facades integrated with phase change material in subtropical Hong Kong", *Energy and Buildings*, 43, pp. 2947-2955.

- Chandrasekharan R., Edwin S. L., Fisher D. E., Deokar P. S. 2013. "An Enhanced Simulation Model for Building Envelopes with Phase Change Materials", *ASHRAE Annual Conference*, Denver (Colorado), 22-26 de junio.
- Cheng R., Pomianowski M., Wang X., Heiselberg P., Zhang Y. 2013. "A new method to determine thermophysical properties of PCM-concrete brick", *Applied Energy*, 112, pp. 988-998.
- Cheng W. L., Zhang R. M., Xie K., Liu N., Wang J. 2010. "Heat conduction enhanced shape-stabilized paraffin/HDPE composite PCMs by graphite addition: Preparation and thermal properties", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94, pp. 1636-1642.
- Cheng W., Xie B., Zhang R., Xu Z. Xia Y. 2015. "Effect of thermal conductivities of shape stabilized PCM on under-floor heating system", *Applied Energy*, 144, pp. 10-18.
- Churchill S. W., Chu H. H. S. 1975. "Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a horizontal cylinder", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 18, 1323-1329.
- Claros-Marfil L. J., Dentel A., Padial J. F., Lauret B. 2014. "Active and passive PCM walls simulation - a new TRNSYS PCM-type", *I Congreso Internacional sobre investigación en Construcción y Tecnología Arquitectónica*, Madrid, 11-13 de junio de 2014.
- Coquard R., Panel B. 2009. "Adaptation of the FLASH method to the measurement of the thermal conductivity of liquids or pasty materials", *International Journal of Thermal Sciences*, 48, pp. 747-760.
- Coz Díaz J. J. del, Álvarez Rabanal F. P. 2011. *Estudio de la aplicación de un analizador de conductividad térmica mediante la técnica de fuente plana transitoria modificada a materiales de construcción* (Informe Técnico), Universidad de Oviedo.
- Crawley D. B., Hand J. W., Kummert M., Griffith B. T. 2008. "Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs", *Building and Environment*, 43, vol. 4, pp. 661-673.
- Cubillas Fernández P. R., Rodríguez Maestre I., Foncubierta Blázquez J. L., González Siles G. 2015. "Método explícito vs. implícito en la resolución del intercambio radiante de onda larga en simulación térmica de edificios", *9º Congreso Nacional de Ingeniería Termodinámica*, Cartagena, junio.
- Cubillas P. R. 2008. *Modelo de simulación térmica de edificios orientado al acoplamiento con sistemas de calefacción*, (Tesis doctoral), Escuela Politécnica Superior de Algeciras, Universidad de Cádiz.
- Cui H., Memon S. A., Liu R. 2015. "Development, mechanical properties and numerical simulation of macro encapsulated thermal energy storage concrete", *Energy and Buildings*, 96, pp. 162-174.
- De Gracia A., Navarro L., Castell A., Ruiz-Pardo Á., Álvarez S., Cabeza L. F. 2013a. "Experimental study of a ventilated facade with PCM during winter period", *Energy and Buildings*, 58, pp. 324-332.
- De Gracia A., Navarro L., Castell A., Ruiz-Pardo Á., Álvarez S., Cabeza L. F. 2013b. "Thermal analysis of a ventilated facade with PCM for cooling applications", *Energy and Buildings*, 65, 508-515.
- Delgado M., Lázaro A., Peñalosa C., Zalba B. 2014. "Experimental analysis of the influence of microcapsule mass fraction on the thermal and rheological behaviour of a PCM slurry", *Applied Thermal Engineering*, 63, pp. 11-22.
- Dentel A., Stephan W. 2010. "Thermal confort in romos with active PCM constructions", *8th International Conference on System Simulation in Buildings*, Lieja, 13-15 de diciembre.

- Dentel A., Wolfran S. 2013. *Trnsys type 399. Phase change materials in passive and active wall constructions. Model description and implementing into TRNSYS. Version 1.5*, Georg Simon Ohm University of Applied Sciences. Institute for Energy and Building, Germany, mayo. Accesible en http://www.trnsys.de/download/de/ts_type_399_en.pdf
- Deru M., Judkoff R., Torcellini P. 2002. *SUNREL. Technical reference manual*, National Renewable Energy Laboratory.
- Desgrosseilliers L., Allred P., Groulx D., White M. A. 2013. "Determination of enthalpy-temperature-compositions relations in incongruent-melting phase change materials", *Applied Thermal Engineering*, 61, pp. 193-197.
- Dolado P., Lázaro A., Marín J. M., Zalba B. 2011. "Characterization of melting and solidification in a real scale PCM-air heat exchanger: Numerical model and experimental validation", *Energy Conversion and Management*, 52, pp. 1890-1907.
- Dolado P., Mazo J., Lázaro A., Marín J.M., Zalba B. 2012. "Experimental validation of a theoretical model: Uncertainty propagation analysis to a PCM-air thermal energy storage unit", *Energy and Buildings*, 45, pp. 124-131.
- Dolado P., Miranda I., Urieta J.S., Coronas J., Lázaro A. 2014. "Packed bed zeolite experimental setup to study TCS systems up to 200°C". *Eurosun 2014*, Aix-les Bains (Francia).
- Domínguez-Muñoz F., Cejudo-López J. M., Carrillo-Andrés A. 2010. "Uncertainty in peak cooling load calculations", *Energy and Buildings*, 42, pp. 1010-1018.
- Eddhahak-Ouni A., Drissi S., Colin J., Neji J., Care S. 2014. "Experimental and multi-scale analysis of the thermal properties of Portland cement concretes embedded with microencapsulated phase change materials", *Applied Thermal Engineering*, 64, pp. 32-39.
- Egolf P. W., Manz H. 1994. "Theory and modeling of phase change materials with and without mushy regions", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 37, vol. 18, pp. 2917-2924.
- Elsherbiny S. M., Raithby G.D., Hollands K. G. T. 1982. "Heat transfer by natural convection across vertical and inclined air layers", *ASME Transactions February*, 104, p. 96.
- Entrop A.G., Brouwers H. J. J., Reinders A. H. M. E. 2011. "Experimental research on the use of micro-encapsulated phase change materials to store solar energy in concrete floors and to save energy in Dutch houses", *Solar Energy*, 85, pp. 1007-1020.
- Eucken A. F. 1932. "Gebiete Ingenieur", *B3 Forschungsheft*, 353, p. 1-16.
- Fallahi A., Shukla N., Kosny J. 2012. "Numerical Thermal Performance Analysis of PCMs Integrated with Residential Attics", *International Building Performance Simulation Association SimBuild*, University of Wisconsin, Madison (USA).
- Farid M. M., Chen X. D. 1999. "Domestic electrical space heating with heat storage. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers", *Part A: Journal of Power and Energy*, 213, pp. 83-92.
- Farid M. M., Kong W. J. 2001. "Underfloor heating with latent heat storage. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers", *Part A: Journal of Power and Energy*, 215, vol. 5, pp. 601-609.
- Feldman D., Banu D., Hawes D. 1995. "Development and application of organic phase change mixtures in thermal storage gypsum wallboard", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 36, pp. 147-157.

- Feldman D., Banu D., Hawes D., Ghanbari E. 1991. "Obtaining an energy storing material by direct incorporation of an organic phase change material in gypsum wallboard", *Solar Energy Materials*, 22, pp. 231-242.
- Finlayson E. U., Arasteh D. K., Huizenga C., Rubin M. D., Reilly M. S. 1993. *WINDOW 4.0: documentation of calculation procedures*, Documento interno
- Fort K. 2001. *TYPE 360: Floor Heating and Hypocaust*. Accesible en: http://www.trnsys.de/download/de/ts_type_360_de.pdf.
- Franquet E., Gibout S., Bédecarrats J. P., Haillet D., Dumas J. P. 2012. "Inverse method for the identification of the enthalpy of phase change materials from calorimetry experiments", *Thermochimica Acta*, 546, pp. 61-80.
- Franquet E., Gibout S., Tittlein P., Zalewski L., Dumas J.P. 2014. "Experimental and theoretical analysis of a cement mortar containing microencapsulated PCM", *Applied Thermal Engineering*, 73, pp. 32-40.
- Fürbringer J. M., Roulet C. A. 1995. "Comparison and combination of factorial and Monte-Carlo design in sensitivity analysis", *Building and Environment*, 30, pp. 505-519.
- Furler R. A. 1991. "Angular dependence of optical properties of homogeneous glasses", *ASHRAE Transactions*, 97, p. 2.
- Geissler A. 2008. SPMCMP56 subroutine in ESP-r Source Standard Code. http://espr.trac.cvsdude.com/espr/browser/branches/Joe_Clarke/src/esrubld/spmatl.F?rev=4529
- Gossard D., Karkri M., AlMaadeed M. A., Krupa I. 2015. "A new experimental device and inverse method to characterize thermal properties of composite phase change materials", *Composite Structures*, 133, 1149-1159.
- Guichard S., Miranville F., Bigot D., Boyer H. 2014. "A thermal model for phase change materials in a building roof for a tropical and humid climate: Model description and elements of validation", *Energy and Buildings*, 70, pp. 71-80.
- Günther E., Hiebler S., Mehling H., Redlich R. 2009. "Enthalpy of phase change material as a function of temperature: required accuracy and suitable measurement methods", *International Journal of Thermophysics*, 30, pp. 1257-1269.
- Gustafsson S.E. 1991. "Transient plane source techniques for thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of solid materials", *Review of Scientific Instruments*, 62, pp. 797-804.
- Haavi T., Gustavsen A., Cao S., Uvsløkk S., Jelle B. P. 2011. "Numerical simulations of a well-insulated wall assembly with integrated phase change material panels Comparison with hot box experiments", *The international conference on sustainable systems and the environment*, Sharjah, United Arab Emirates.
- Harris A., Kuvandykova D., Bateman R. 2013. "Application of the modified transient plane source technique in testing the thermal conductivity of concrete", *Proceedings of the 31st International Thermal Conductivity Conference and 19th International Thermal Expansion Symposium*, Lancaster (Pennsylvania), pp. 41-47.
- Haurie L., Mazo J., Delgado M., Zalba B. 2014. "Fire behaviour of a mortar with different mass fractions of phase change materials for use in radiant floor systems", *Energy and Buildings*, 84, pp. 86-93.
- Hausmann T., Schossig P. 2006. "PCM-aktiv: A project for active driven construction materials with latent heat storage", *7th Conference on phase change materials and slurries for refrigeration and air conditioning*, Dinan (Francia), septiembre.

- Hausmann T., Schossig P., Grossmann L. 2009. "Experiences with lowex PCM chilled ceilings in demonstration buildings", *8th IIR Conference on Phase Change Materials and Slurries for Refrigeration and Air Conditioning*, Karlsruhe (Alemania), junio.
- Hawes D.W. 1991. *Latent Heat Storage in Concrete*, (PhD Thesis) Concordia University, Montreal, Quebec (Canadá).
- Heim D., Clarke J. A. 2004. "Numerical modelling and thermal simulation of PCM-gypsum composites with ESP-r", *Energy and Buildings*, 36, pp. 795-805.
- Hiebler S. 2007. *Kalorimetrische methoden zur bestimmung der enthalpie von latentwärmespeichermaterialien während des Phasenübergangs*, (Tesis doctoral), Technische Universität München.
- Hiller M. D. E., Beckman W. A., Mitchell J. W. 2000. "TRNSHD- a program for shading and insolation calculations", *Building and Environment*, 35, pp. 633-644.
- Hollands K. G. T., Unny S. E., Raithby G. D., Konicek L. 1976. "Free convective heat transfer across inclined air layers", *Journal of Heat Transfer*, 98, 189-193.
- Hong H., Kim S. K., Kim Y. S. 2004. "Accuracy improvement of T-history method for measuring heat of fusion of various materials", *International Journal of Refrigeration*, 27, pp. 360-366.
- Hopf C. J., Hensen J. L. M. 2011. "Uncertainty analysis in building performance simulation for design support", *Energy and Buildings*, 43, pp. 2798-2805.
- Huang K., Feng G., Zhang J. 2014. "Experimental and numerical study on phase change material floor in solar water heating system with a new design", *Solar Energy*, 105, pp. 126-138.
- Hunger M., Entrop A. G., Mandilaras I., Brouwers H. J. H., Founti M. 2009. "The behaviour of self-compacting concrete containing micro-encapsulated PCM", *Cement and Concrete Composites*, 31, pp. 731-743.
- Ibáñez M., Lázaro A., Zalba B., Cabeza L.F. 2005. "An approach to the simulation of PCMs in building applications using TRNSYS", *Applied Thermal Engineering*, 25, vols. 11-12, pp. 1796-1807.
- IEA ECES Annex 23, *Applying energy storage in ultra-low energy buildings. Final Report, Chapter 8: Model verification and validation influence of parameters* (K. Johannes y F. Haghighat), 2013.
- Incropera F. P., DeWitt D. P., Bergman T. L., Lavine A. S. 2007. *Fundamentals of heat and mass transfer*, New Jersey, John Wiley and Sons.
- Izquierdo-Barrientos M. A., Belmonte J. F., Rodríguez-Sánchez D., Molina A. E., Almendros-Ibáñez J. A. 2012. "A numerical study of external building walls containing phase change materials (PCM)", *Applied Thermal Engineering*, 47, pp. 73-85.
- Jaworski M., Abeid S. 2011. "Thermal conductivity of gypsum with incorporated phase change material (PCM) for building applications", *Journal of Power Technologies*, 91, vol. 2, pp. 49-53.
- Jensen S. O. 1995. "Validation of building energy simulation programs: a methodology", *Energy and Buildings*, 22, pp. 133-144.
- Jeong S. G., Jeon J., Chung O., Kim S., 2013. "Evaluation of PCM/diatomite composites using exfoliated graphite nanoplatelets (xGnP) to improve thermal properties", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 114, pp. 689-698.
- Jeong S. G., Lee J. H., Seo J., Kim S. 2014. "Thermal performance evaluation of Bio-based shape stabilized PCM with boron nitride for energy saving", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 71, pp. 245-250.

- Jin X., Zhang X. 2011. "Thermal analysis of a double layer phase change material floor", *Applied Thermal Engineering*, 31, pp. 1576-1581.
- Jin X., Zhang X., Luo Y. 2010. "A calculation method for the floor surface temperature in radiant floor system", *Energy and Buildings*, 42, pp. 1753-1758.
- Jokisalo J., Lamberg P., Siren K. 1999. "Suitability of building construction materials in short-term energy storage office room simulations", *Proceedings of IEA Annex 10-PCM and chemical reactions for thermal energy storage, 3rd workshop*, Finland, Helsinki University of Technology, pp. 11-18.
- Jokisalo J., Lamberg P., Siren K. 2000. "Thermal simulation of PCM structures with TRNSYS", *Terrastock 2000: Proceedings of 8th International Conference on Thermal Energy Storage*, Stuttgart, Germany, 28 de agosto-1 de septiembre.
- Judkoff R., Neymark J. 1995. *International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and diagnostic method*, (Informe final NREL/PC472-6231), National Renewable Energy Laboratory.
- Judkoff R., Neymark J. 2013. "Twenty years on!: Updating the IEA BESTEST building thermal fabric test cases for ASHRAE Standard 140", *Building Simulation Conference*, Chambéry (Francia).
- Judkoff R., Wortman D., O'Doherty B., Burch J. 2008. *A methodology for validating building energy analysis simulations*, (Informe técnico NREL/TP-550-42059), Colorado, National Renewable Energy Laboratory.
- Kalyanova O., Heiselberg P. 2009. *Empirical Validation of Building Simulation Software: Modelling of Double Facades*, (Informe técnico), Solar Heating and Cooling Programme International Energy Agency, Alborg University.
- Kalz D., Pfafferott J., Schossig P., Herkel S. 2006. "Thermally activated building systems using phase change materials", *International Solar Energy Society Eurosun 2006*, Glasgow (Escocia), junio.
- Kalz D., Pfafferott J., Kagerer F. 2007. "Monitoring and evaluation of night-time ventilation and radiant cooling concepts applied to low energy office buildings", *Proceedings of the 10th International Building Performance Simulation Association Conference and Exhibition*, Pekín (China), septiembre.
- Karkri M., Lachheb M., Albouchi F., Nasrallah S. B., Krupa I. 2015. "Thermal properties of smart microencapsulated paraffin/plaster composites for the thermal regulation of buildings", *Energy and Buildings*, 88, 183-192.
- Kheradmand M., Castro-Gomes J., Azenha M., Silva P. D., Aguiar J. L. B., Zoorob S. E. 2015. "Assessing the feasibility of impregnating phase change materials in lightweight aggregate for development of thermal energy storage systems", *Construction and Building Materials*, 89, pp. 48-59.
- Kim S., Paek S., Jeong S. G., Lee J. H., Kim S. 2014b. "Thermal performance enhancement of mortar mixed with octadecane/xGnP SSPCM to save building energy consumption", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 122, pp. 257-263.
- Kim S., Seo J., Cha J., Kim S. 2013. "Chemical retreating for gel-typed aerogel and insulation performance of cement containing aerogel", *Construction and Building Materials*, 40, pp. 501-505.
- Kim S., Seong J.C., Chung O., Jeong S. G., Kim S. 2014. "Thermal characteristics of mortar containing hexadecane/xGnPSSPCM and energy storage behaviors of envelopes integrated with enhanced heat storage composites for energy efficient buildings", *Energy and Buildings*, 70, pp. 472-479.

- Klinker F., Konstantinidou C., Mehling H., Weinlaeder H. 2014. "Dynamic thermal behaviour of two newly developed PCM cooling ceiling prototypes", *Eurosun 2014*, Aix-les-Bains (Francia) 16-19 de septiembre.
- Kokogiannakis G. 2008. *Support for the integration of simulation in the European energy performance of building directive*, (PhD Thesis), ESRU University of Strathclyde.
- Kosntantinidou C., Göbel A., Kenisarina K., Hemberber F., Weinläder H., Mehling H. 2014. "Development of measurement setup to determine the dynamic thermal behaviour of building components with PCM", Eurotherm Seminar, Lleida (España), 28-30 de mayo.
- Konstantinidou C., Klinker F., Weinlaeder H. 2014. "Measurements of the performance of the room integrated PCM in the new Energy Efficiency Center", *Eurosun 2014*, Aix-les-Bains (Francia) 16-19 de septiembre.
- Koschenz M., Dorer V. 1999. "Interaction of an air system with concrete core conditioning", *Energy and Buildings*, 30, pp. 139-145.
- Koschenz M., Lehmann B. 2000. *Thermoaktive Bauteilsysteme Tabs*, EMPA, Duebendorf Switzerland.
- Kosny J., Kossecka E., Brzezinski A., Tleoubaev A., Yarbrough D. 2012. "Dynamic thermal performance analysis of fiber insulations containing bio-based phase change materials (PCMs)", *Energy and Buildings*, 52, 122-131.
- Kravvaritis E. D., Antonopoulos K. A., Tzivanidis C. 2010. "Improvements to the measurement of the thermal properties of phase change materials", *Measurement Science and Technology*, 21, 045103.
- Kuznik F., Virgone J., Roux J. J. 2008. "Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: A full scale experimental investigation", *Energy and Buildings*, 40, pp. 148-156.
- Kuznik F., Virgone J. 2009. "Experimental assessment of a phase change material for wall building use", *Applied Energy*, 86, vol. 10, pp. 2038-2046.
- Kuznik F., Virgone J. 2009b. "Experimental investigation of wallboard containing phase change material: Data for validation of numerical modelling", *Energy and Buildings*, 41, vol. 5, pp. 561-570.
- Kuznik F., Virgone J., Johannes K. 2010. "Development and validation of a new TRNSYS type for the simulation of external building walls containing PCM", *Energy and Buildings*, 42, vol. 7, pp. 1004-1009.
- Lachheb M., Karkri M., Albouchi F., Nasrallah S. B., Fois M., Sbolciak P. 2014. "Thermal properties measurement and heat storage analysis of paraffin/graphite composite phase change material", *Composites: Part B*, 66, 518-525.
- Laouadi A. 2004. "Development of a radiant heating and cooling model for building energy simulation software", *Building and Environment*, 39, pp. 421-431.
- Lázaro A. 2008. *Almacenamiento de energía mediante cambio de fase. Aplicaciones en edificios: caracterización del comportamiento de los materiales e instalación de ensayos para prototipos de intercambio de calor con aire*, (Tesis Doctoral), Universidad de Zaragoza.
- Lázaro A., Günther E., Mehling H., Hiebler S., Marín J.M., Zalba B. 2006. "Verification of a T-history installation to measure enthalpy versus temperature curves of phase change materials", *Measurements Science and Technology*, 17, pp. 2168-2174.
- Lázaro A., Marín J. M., Dolado P., Zalba B. 2008. "Experimental setup to study thermal effects of phase change materials inclusion into building materials", *Eurosun 2008*, Lisboa (Portugal), octubre.

- Lázaro A., Peñalosa C., Solé A., Diarce G., Haussmann T. Fois M., Zalba B., Gshwander S., Cabeza L. F. 2013. "Intercomparative tests on phase change materials characterisation with differential scanning calorimeter", *Applied Energy*, 109, pp. 415-420.
- Lecompte T., Le Bideau P., Glouannec P., Nortershauser D., Le Masson S. 2015. "Mechanical and thermo-physical behaviour of concretes and mortars containing phase change material", *Energy and Buildings*, 94, pp. 52-60.
- Lee T. 1998. *Latent and sensible heat storage in concrete blocks*, (Master Thesis), Concordia University, Montreal, Quebec, Canada.
- Lee T., Hawes D.W., Banu D., Feldman D. 2000. "Control aspects of latent heat storage and recovery in concrete", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 62, vol. 3, pp. 217-237.
- Lewis T., Nielsen L. 1970. "Dynamic mechanical properties of particulate filled composites", *Journal of Applied Polymer Science*, 14, pp. 1449-1471.
- Li M., Wu Z., Tan J. 2013. "Heat storage properties of the cement mortar incorporated with composite phase change material", *Applied Energy*, 193, pp. 393-399.
- Li X., Sanjayan J. G., Wilson J. L. 2014. "Fabrication and stability of form-stable diatomite/paraffin phase change material composites", *Energy and Buildings*, 76, 284-294.
- Lin K., Zhang Y., Di H., Rui Y. 2007. "Study of an electrical heating system with ductless air supply and shape-stabilized PCM for thermal storage", *Energy Conversion and Management*, 48, pp. 2016-2024.
- Lin K., Zhang Y., Xu X., Di H., Yang R., Qin P. 2004. "Modeling and simulation of under-floor electric heating system with shape-stabilized PCM plates", *Building and Environment*, 39, pp. 1427-1434.
- Lin K., Zhang Y., Xu X., Di H., Yang R., Qin P. 2005. "Experimental study of under-floor electric heating system with shape-stabilized PCM plates", *Energy and Buildings*, 37, pp. 215-220.
- Ling T. C., Poon C. S. 2013. "Use of phase change materials for thermal energy storage in concrete: an overview", *Construction and Building Materials*, 46, pp. 55-62.
- Lomas K. J., Eppel H. 1992. "Sensitivity analysis techniques for building thermal simulation programs", *Energy and Buildings*, 19, pp. 21-44.
- Lomas K. J., Eppel H., Martin C. J., Bloomfield D. P. 1997. "Empirical validation of building simulation programs", *Energy and Buildings*, 26, pp. 253-275.
- Loutzenhiser P., Manz H. 2007. *Empirical validations of shading/daylighting/load interaction in building energy simulation tools. A report for the International Energy Agency's SHC Task 34/ECBCS Annex 43, Project C*, (Informe final), Iowa State University.
- Loutzenhiser P. G., Manz H., Felsmann C., Strachan P. A., Frank T., Maxwell G. M. 2007. "Empirical validation of models to compute solar irradiance on inclined surfaces for building energy simulation", *Solar Energy*, 81, 254-267.
- Lu S., Liu S., Huang J., Kong X. 2014. "Establishment and experimental verification of PCM room's TRNSYS heat transfer model based on latent heat utilization ratio", *Energy and Buildings*, 84, pp. 287-298.
- Lucas S. S., Ferreira V. M., Barroso de Aguiar J. L. 2013. "Latent heat storage in PCM containing mortars-study of microstructural modifications", *Energy and Buildings*, 66, pp. 724-731.
- Macdonald I. 2002. *Quantifying the effects of uncertainty in building simulation*, (PhD Thesis), University of Strathclyde, Glasgow (UK).

- Macdonald I., Strachan P. 2001. "Practical application of uncertainty analysis", *Energy and Buildings*, 33, pp. 219-227.
- Mandilaras I., Founti M. 2009. "Experimental investigation of agglomerate marbles containing phase change materials", *11th international conference on thermal energy storage-EffStock*, Estocolmo (Suecia), junio.
- Mandilaras I. D., Kontogeorgos D. A., Founti M. A. 2015. "A hybrid methodology for the determination of the effective heat capacity of PCM enhanced building components", *Renewable Energy*, 76, 790-804.
- Marín J. M., Zalba B., Cabeza L. F., Mehling H. 2003. "Determination of enthalpy-temperature curves of phase change materials with the temperature-history method: improvement to temperature dependent properties", *Measurements Science and Technology*, 14, pp. 184-189.
- Maxwell J. C. A. 1954. *Treatise on electricity and magnetism*, New York, Dover.
- Mazo J., Delgado M., Lázaro A., Dolado P., Peñalosa C., Marín J. M., Zalba B. 2015. "Analysis on the influence of thermal gradients inside T-history samples on the method accuracy: theoretical approach", *IEA ECES Greenstock. The 13th International Conference on Energy Storage*, Pekín (China).
- Mazo J., Delgado M., Lázaro A., Dolado P., Peñalosa C., Marín J. M., Zalba B. 2015. "A theoretical study on the accuracy of the T-history method for enthalpy-temperature curve measurement: analysis of the influence of thermal gradients inside T-history samples", publicación aceptada el 29 de septiembre de 2015 en la revista *Measurement Science and Technology*.
- Mazo J., Delgado M., Marín J. M., Zalba B. 2012. "Modeling a radiant floor system with phase change material (PCM) integrated into a building simulation tool: analysis of a case study of a floor heating system coupled to a heat pump", *Energy and Buildings*, 47, pp. 458-466.
- Mazo J., Delgado M., Marín J. M., Zalba B. 2012b. "Analysis of a floor heating system with PCM coupled to a heat pump. Study of its technical and economic feasibility", *Innostock 2012. The 12th International Conference on Energy Storage*, Lleida (Spain).
- Mazo J., El Badry A. T., Carreras J., Delgado M., Boer D., Zalba B. 2015. "Uncertainty propagation and sensitivity analysis of thermo-physical properties of phase change materials (PCM) in the energy demand calculations of a test cell with passive latent heat storage", *Applied Thermal Engineering*, 90, pp. 596-608.
- McClellan T. M., Pedersen C. O. 1997. "Investigation of outside heat balance models for use in a heat balance cooling load calculation", *ASHRAE Transactions*, 103, pp. 469-484.
- McKay M. D., Beckman R. J., Conover W. J. 2000. "A comparison of three methods for selecting values of input variables in the analysis of output from computer code", *Technometrics*, 42, pp. 55-61.
- Mehling H., Ebert H. P., Schossig P. 2006. "Development of standards for materials testing and quality control of PCM", *7th IIR Conference on Phase Change Materials and Slurries for Refrigeration and Air Conditioning*, Dinan (Francia), septiembre.
- Mehling, H., Krippner, R., Hauer, A. 2002. "Research project on PCM in wood-lightweight concrete", *IEA, ECES IA Annex 17, Advanced thermal energy storage through phase change materials and chemical reactions - feasibility studies and demonstration projects. 2nd Workshop*, Ljubljana (Slovenia), 3-5 de abril.
- Memon S. A. 2014. "Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, pp. 870-906.

- Miranville F. 2002. *Contribution à l'étude des parois complexes en physique du bâtiment: modélisation, expérimentation et validation expérimentale de complexes de toitures incluant des produits minces réfléchissants en climat tropical humide*, (Tesis Doctoral), Université de la Réunion.
- Mirsadeghi M., Cóstola D., Blocken B., Hensen J. L. M. 2013. "Review of external convective heat transfer coefficient models in building energy simulation programs: Implementation and uncertainty", *Applied Thermal Engineering*, 56, pp. 134-151.
- Moreno-Alvarez L., Herrera J. N., Meneses-Fabian C. 2010. "A differential formulation of the T-history calorimetric method", *Measurement Science and Technology*, 21, 127001.
- Navarro L., De Gracia, A., Niall D., Castell A., Browne M., McCormack S. J., Griffiths P., Cabeza L. F. 2015. "Thermal energy storage in buildings integrated thermal systems: A review. Part 2. Integration as passive system", *Renewable Energy*, pp. 1-23.
- Neeper D. A. 2000. "Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage", *Solar Energy*, 68, pp. 393-403.
- Neymark J., Judkoff R. 2002. *International Energy Agency energy simulation test and diagnostic method for heating, ventilating and air-conditioning equipment models (HVAC BESTEST)*, Informe técnico NREL/TP-550-30152. National Renewable Energy Laboratory.
- Oliver Ramírez A. 2009. *Integración de materiales de cambio de fase en placas de yeso reforzadas con fibras de polipropileno. Aplicación a sistemas de refrigeración y calefacción pasivos para almacenamiento de calor latente en edificios*, (Tesis Doctoral), Universidad Politécnica de Madrid.
- Oppenheim A.K. 1956. "Radiation analysis by the network method", *Transactions of the ASME*, 78, 725-735.
- Pal R. 2007. "New models for thermal conductivity of particulate composites", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 26, pp. 643-651.
- Palomo del Barrio E., Dauvergne J. L. 2011. "A non-parametric method for estimating enthalpy-temperature functions of shape-stabilized phase change materials", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54, pp. 1268-1277.
- Palomo del Barrio E., Guyon G. 2003. "Theoretical basis for empirical model validation using parameters space analysis tools", *Energy and Buildings*, 35, vol. 10, pp. 985-996.
- Palomo del Barrio E., Guyon G. 2004. "Application of parameters space analysis tools for empirical model validation", *Energy and Buildings*, 36, pp. 23-33.
- Patankar S. V. 1980. *Numerical heat transfer and fluid flow*, Nueva York, McGraw-Hill.
- Pedersen C. O. 2007. "Advanced zone simulation in Energy Plus: incorporation of variable properties and phase change material (PCM) capability", *Building Simulation*, Beijing (China).
- Peñalosa C., Lázaro A., Delgado M., Dolado P., Zalba B. 2014. "Valorization of a paraffin as low cost Phase Change Material. Characterization for using in thermal energy storage", *Eurotherm Seminar. Advances in Thermal Energy Storage*, Lleida (Spain).
- Pérez R., Ineichen P., Seals R., Michalsky J., Stewart R. 1990. "Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance", *Solar Energy*, 44, pp. 271-289.
- Petukhov B. S. 1970. *Advances in Heat Transfer*, vol. 6, Academic Press-Irvine-Hartnett, New York.
- Pomianowski M., Heiselberg P., Jensen R. L. 2011. "Experimental investigation of thermal conductivity of concrete containing micro-encapsulated phase change materials",

The 7th international symposium on heating, ventilation and air conditioning, Shanghai (China), noviembre.

- Pomianowski M., Heiselberg P., Jensen R. L. 2012. "Dynamic heat storage and cooling capacity of a concrete deck with PCM and thermally activated building system", *Energy and Buildings*, 53, pp. 96-107.
- Pomianowski M., Heiselberg P., Jensen R. L., Cheng R., Zhang Y. 2014. "A new experimental method to determine specific heat capacity of inhomogeneous concrete material with incorporated microencapsulated-PCM", *Cement and Concrete Research*, 55, pp. 22-34.
- Pons O., Aguado A., Fernández A. I., Cabeza L. F., Chimenos J. M. 2014. "Review of the use of phase change materials (PCMs) in buildings with reinforced concrete structures", *Materiales de Construcción*, 64, vol. 315, doi:10.3989/mc.2014.05613.
- Powers T. C., Brownyard T. L. 1946. "Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste", *Journal Proceedings*, 43, pp. 249-336.
- Rady M. 2009. "Thermal performance of packed bed thermal energy storage units using multiple granular phase change composites", *Applied Energy*, 86, vol. 12, pp. 2704-2720.
- Rady M. A., Arquis E., Le Bot C. 2009. "Characterization of granular phase changing composites for thermal energy storage using the T-history method", *International Journal of Energy Research*, 34, pp. 333-344.
- Rady M., Arquis E. 2010. "A comparative study of phase change characteristics of granular phase change materials using DSC and T-history methods", *Fluid Dynamics and Materials Processing*, 6, vol. 2, pp. 137-152.
- Rathgeber C., Schmit H., Hennemann P., Hiebler S. 2014. "Calibration of a T-history calorimeter to measure enthalpy curves of phase change materials in the temperature range from 40 to 200°C", *Measurement Science and Technology*, 25, 035011.
- Royston J. P. 1982. "An extension of Shapiro and Wilk's W test for normality to large samples", *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, 31, pp. 115-124.
- Sakulich A.R., Bentz D.P. 2012, "Incorporation of phase change materials in cementitious systems via fine light weight aggregate", *Construction and Building Materials*, 35, pp. 483-490.
- Salt H. 1985. "Preliminary design considerations for a rocked bed/floor space-heating system", *Building and Environment*, 20, vol. 4, pp. 221-231.
- Saltelli A. 2004. *Sensitivity analysis in practise. A guide to assessing scientific models*, Hoboken, New Jersey (USA), John Wiley and Sons.
- Sandnes B., Rekstad J. 2006. "Supercooling salt hydrates: Stored enthalpy as a function of temperature", *Solar Energy*, 80, pp. 616-625.
- Sari A. 2004. "Form-stable paraffin/high density polyethylene composites as solid-liquid phase change material for thermal energy storage: preparation and thermal properties", *Energy Conversion and Management*, 45, pp. 2033-2042.
- Schmit H. Rathgeber C., Pfeffer W., Hiebler S., Hauer A. 2015. "Determination of the solid-liquid temperature-composition diagram of the pseudo-binary system $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ and $\text{CaBr}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ via T-History measurements", *IEA ECES Greenstock. The 13th International Conference on Energy Storage*, Pekín (China).

- Schossig P., Henning H. M., Gschwander S., Haussmann T. 2005, "Micro-encapsulated phase change materials integrated into construction materials", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 89, pp. 297-306.
- Shapiro M., Feldman D., Hawes D., Banu D. 1987. "PCM thermal storage in drywall using organic phase change material", *Passive Solar Journal*, 4, pp. 419-438.
- Sharifi N. P., Sakulich A. 2015. "Application of Phase Change Materials to improve thermal performance of cementitious material", *Energy and Buildings*, 103, pp. 83-95.
- Shin M. S., Rhee K. R., Ryu S. R., Myoung S. Y. Kim K. K. 2015. "Design of radiant floor heating panel in view of floor surface temperatures", *Building and Environment*, 92, pp. 559-577.
- Shukla N., Fallahi A., Kosny J. 2012. "Performance characterization of PCM impregnated gypsum board for building applications", *Energy Procedia*, 30, pp. 370-379.
- Sittisart P., Farid M. 2011. "Fire retardants for phase change materials", *Applied Energy*, 88, pp. 3140-3145.
- Sourbron M., Helsen L., Baelmans M. 2014. "Analytical expression for transient heat transfer in concrete core activation", *ASHRAE Transactions*, 120, pp. 209-225.
- Spitz C., Mora L., Wurtz E., Jay A. 2012. "Practical application of uncertainty analysis and sensitivity analysis on an experimental house", *Energy and Buildings*, 55, pp. 459-470.
- Stankovic S., Kyriacou P. A. 2013. "Improved measurement technique for the characterization of organic and inorganic phase change materials using the T-history method", *Applied Energy*, 109, pp. 433-440.
- Strand R. K., Baumgartner K. T. 2005. "Modeling radiant heating and cooling systems: integration with a whole-building simulation program", *Energy and Buildings*, 37, pp. 389-397.
- Strand R. K., Pedersen C. O. 2002. "Modeling radiant systems in an integrated heat balance based energy simulation program", *ASHRAE Transactions*, 108, pp. 1-9.
- Stritih U., Novak P. 1996. "Solar heat storage wall for building ventilation", *Renewable Energy*, 8, vols. 1-4, pp. 268-271.
- Tabares-Velasco P. C. 2012. "Energy impacts of nonlinear behavior of PCM when applied into building envelope", *Proceedings of the ASME 2012 6th International Conference on Energy Sustainability and 10th Fuel Cell Science*, San Diego (California), 23-26 de julio.
- Tabares-Velasco P. C., Christensen C., Bianchi M. 2012, "Verification and validation of EnergyPlus phase change material model for opaque wall assemblies", *Building and Environment*, 54, pp. 186-196.
- Thévenin L. 1883. "Extension de la loi d'Ohm aux circuits électromoteurs complexes", *Annales Télégraphiques*, 10, pp. 222-224.
- TRNSYS 16 2007. *Multizone Building Modelling With Type56 And Trnbuild*, vol. 6, Madison, Solar Energy Laboratory-University of Wisconsin-Madison.
- TRNSYS 17 2009. *Mathematical Reference*, vol. 4, Madison, Solar Energy Laboratory-University of Wisconsin-Madison.
- Tzivanidis C., Antonopoulos K. A., Kravvaritis E. D. 2012. "Parametric analysis of space cooling system based on night ceiling cooling with PCM-embedded piping", *International Journal of Energy Research*, 36, pp. 18-35.

- U.S. DOE 2015. *EnergyPlus™ Documentation. Engineering Reference. The Reference to EnergyPlus Calculations*, University of Illinois, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Vaz Sá A., Azenha M., Souza H. de, Samagaio A. 2012, "Thermal enhancement of plastering mortars with phase change materials", *Energy and Buildings*, 49, pp. 16-27.
- Vicente R., Silva T. 2014. "Brick masonry walls with PCM macrocapsules: An experimental approach", *Applied Thermal Engineering*, 67, pp. 24-34.
- Wakao N., Kageui S. and Funazri T. 1979. "Effect of fluid dispersion coefficients on particle to fluid heat transfer coefficients in packed beds", *Chemical Engineering Science*, 34, pp. 325-336.
- Wang J., Wang Y., Yang R. 2015. "Flame retardance property of shape-stabilized phase change materials", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 140, pp. 439-445.
- Weber T., Jóhannesson G. 2005. "An optimized RC-network for thermally activated building components", *Building and Environment*, 40, pp. 1-14.
- Weber T., Jóhannesson G., Koschenz M., Lehmann B., Baumgartner T. 2005. "Validation of a FEM-program (frequency-domain) and a simplified RC-model (time-domain) for thermally activated building component systems (TABS) using measurement data", *Energy and Buildings*, 37, pp. 707-724.
- Wit S. de, Augenbroe G. 2002. "Analysis of uncertainty in building design evaluations and its implications", *Energy and Buildings*, 34, pp. 951-958.
- Xu B., Li Z. 2013. "Paraffin/diatomite composite phase change material incorporated cement-based composite for thermal energy storage", *Applied Energy*, 103, pp. 229-237.
- Yamaguchi M., Sayama S. 1997. "Heat storage type floor heating system with heat pump driven by nighttime electric power", *Heat transfer- Japanese Research*, 26, vol. 2, pp. 122-130.
- Yu T., Heiselberg P., Lei B., Pomianowski M. 2014. "Validation and modification of modeling thermally activated building systems (TABS) using EnergyPlus", *Building Simulation*, 7, pp. 615-627.
- Zalba B. 2002. *Almacenamiento térmico de energía mediante cambio de fase. Procedimiento experimental*, (Tesis doctoral), Universidad de Zaragoza.
- Zalba B., Marín J. M., Cabeza L. F., Mehling H. 2003. "Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications", *Applied Thermal Engineering*, 23 (3), 251-283.
- Zeng, R. L., Wang X., Zhang Y. P., Di H. F., Zhang Q. L. 2009. "Numerical study of thermal performance of phase change material energy storage floor in solar heating system",
- Zeng, R. L., Wang X., Zhang Y. P., Zhang Q. L., Di H. F. 2010. "Thermal performance of phase change energy storage floor for active solar water-heating system", *Frontiers of Energy and Power Engineering in China*, 4, vol. 2, pp. 185-191.
- Zhang D., Li Z., Zhor J., Wu K. 2004. "Development of thermal energy storage concrete", *Cement and Concrete Research*, 34, pp. 927-934.
- Zhang H., Xu Q., Zhao Z., Zhang J., Sun Y., Sun L., Xu F., Sawada Y. 2012. "Preparation and thermal performance of gypsum boards incorporated with microencapsulated phase change materials for thermal regulation", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 102, pp. 93-102.
- Zhang P., Hu Y., Song L., Ni J., Xing W., Wang J. 2010. "Effect of expanded graphite on properties of high-density polyethylene/paraffin composite with intumescent flame

- retardantas as hape-stabilized phase change material”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94, pp. 360-365.
- Zhang Y. P., Lin K. P., Yang R., Di H. F., Jiang Y. 2006. “Preparation, thermal performance and application of shape-stabilized PCM in energy efficient buildings”, *Energy and Buildings*, 38, pp. 1262-1269.
- Zhang Y., Ding J., Wang X., Yang R., Lin K. 2006b. “Influence of additives on thermal conductivity of shape-stabilized phase change material”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90, pp. 1692-1702.
- Zhang Y., Yi J. 1999. “A simple method, the T-history method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase change materials”, *Measurements Science and Technology*, 10, pp. 201-205.
- Zhang Z., Shi G., Wang S., Fang X., Liu X. 2013. “Thermal energy storage cement mortar containing n-octadecane/expanded graphite composite phase change material”, *Renewable Energy*, 50, pp. 670-675.
- Zhou G., He J. 2015. “Thermal performance of a radiant floor heating system with different heat storage materials and heating pipes”, *Applied Energy*, 138, pp. 648-660.
- Zhu D., Hong T., Yan D., Wang C. 2013. “A detailed loads comparison of three building energy modelling programs”, *EnergyPlus, DeST and DOE-2.1E, Building Simulation*, 6, pp. 323-335.
- Zhu D., Hong T., Yan D., Wang C. 2013. *Comparison of building energy modelling programs: building loads*, (Informe técnico), Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Zsebinszki G., Moreno P., Solé C., Castell A., Cabeza L.F. 2014. “Numerical model evaluation of a PCM cold storage tank and uncertainty analysis of the parameters”, *Applied Thermal Engineering*, 67, pp. 16-23.

Patentes

- Amano R., Ninomiya T. 2006. *Floor Heating Structure*. JP2006046886A
- Anónimo [No consta autoría]. 2012. *Frefabricated Heating Panel*. KR20120132038A
- Asagiri D. 2001. *Floor Heater And Building With Heating Floor*. JP2001074259A
- Baba N., Kiyokawa S., Fujiwara H., Inoue H., Koga Yo., Kiyokawa T. 2005. *Heat Accumulation Unit*. JP2005009829
- Bautevent Gmbh [Solicitante] 2008. *Ceiling, Wall Or Floor Component*. DE102007010923A1
- Ge L., Ge X. 2014. *Phase Change Heat Storage Type Electric Heating Floor*. CN103776080A
- Gib Ges Fuer Innovative Bautechnologie Mbh [Solicitante] 2012. *Construction Of A Heat-Conducting Surface Element*. DE202010016878U1
- Goddard M. H. 2012. *Hydronic Radiant Heating And Cooling System Comprising a Phase Change Material*. GB2490125A
- Guobing Z. 2012. *Indoor Geothermal Heating Structure With Capillary Net And Phase Change Heat Storage Material*. CN202229291U
- Guohui F., Kailiang H. 2012. *Phase Change Energy Storage Heating Floor Board Modularization Manufacturing Method*. CN102506454A
- Homm K.-G., Boiting B. 2003. *Chilled Ceiling With PCM, And PCM Container Usable Therewith*. EP1371915B1
- Huang Z., Zhu Q. 2008. *Thermal Insulation Flooring*. CN100404764C

- Inoue N. 2008. *Heat Storage Sheet For Floor Heating And Floor Heating Panel*. JP2008032260A
- Jian H., Yue Z., Dan L. 2011. *Composite Floor Module With Heat Accumulating And Heat Slowly-Releasing Functions*. CN202023334U
- Kehle S., Kehle G. 2009. *Pre-Fabricated Compound Board Element For Air-Conditioning Areas*. EP2039844A2
- Kienzler Stadtmobiliar KG [Solicitante] 2006. *Multivalent Heating And Cooling Plate Used In Heating Or Cooling Specific Building Area, Has Synthetic Capillary Tubes Fixed Within Channels Formed On Wooden Panel Using Adhesive, And Crossbar And Longitudinal Frame Attached To Wooden Panel*. DE202005018347U1
- Kim Chang H., Cho Yong J. 2013. *Construction Structrue And Method Of Flow Heating System Using Thermal Storage Mortar*. KR20130022062A
- Kim Kyu H., Lee Jang M., Yeom Tae Y., Park Sang K. 2010. *Heating Panel Employing Phase Changing Materials For Building*. WO2010137800A2
- Kim Na Y. 2002. *Regenerative Hypocaust Panel Using PCM*. KR20020079251A
- Kipfelsberger C., Guckert W., Rauch S., Michels R. 2011. *Device For Controlling Temperature In Room Of Building, Has Thermally Coupled Pipes Embedded In Plate, Which Contains Expanded Graphite, Where Plate Is Thermal-Contacted With Surface Area Of Structural Element*. DE102009055441A1
- Koschenz M., Lehmann B., Holst S. 2004. *Thermoactive Wall And Ceiling Element*. EP1470372B1
- Lei M., Kun W., Ran Z., Wenjia S., Gang D., Jinping W. 2012. *Floor With Heat Storage Function*. CN102401423A
- Lin Q. 2008. *Energy Storage Floor Heating Device Made Of Phase-Change Material*. CN201081328Y
- M & W Zander Gebaeudetechnik G [Solicitante] 2007. *A Method For Heating Rooms In Buildings Has A System Of Tubing Conducting A Heat Transfer Fluid Bonded To Aluminium Panels With Phase Change Outer Layers*. DE202006007617U1
- Mathis N., Chandler C. 2004. *Direct thermal conductivity measurement technique*. US6676287B1
- Mei J., Cao G., Jiang X. 2013. *Active-Passive Combined Solar Heating System*. CN203215848U
- Nawrat U. 2004. *Cooled Ceiling Or Refrigerated Stand Having Storage Capabilitiy*. EP1475573B1
- Nuesle F. 2012. *Spatial Element, In Particular For Cooling, Heating And/Or Sound Absorption*. EP2468973A1
- Oekstra B. B. J., Wigchert A. J. M., Pennarts J. R. P., Bloem M. R., Benthem J., Vos Joost He., Stegeman R., Van Der Meulen R. A. 2009. *Heating Or Cooling Ceiling With Corrugated Steel Sheet*. EP20080102237
- Qiuxin L. 2011. *Phase-Change Energy-Storage Type Floor Electric Radiation Heating System*. CN201751747U
- Rehau Ag & Co [Solicitante] 2010. *Klimadecke*. DE202009002910U1
- Sauvageau Y., Caya R. 2005. *Heating Tiles*. US7187854B2
- Schmitz H. 2007. *Air-Conditioning Ceiling Incorporates A Phase Changing Material (PCM) And A Cooling/Heating Conduit, Both Of Which Are In Direct Heat Exchange Contact*. DE102006029597A1
- Toas M. S., Ober D. G., Ellis M. P. 2006. *Loose Fill Insulation Product Having Phase Change Material Therein*. EP1628110A1

- Van Der Brand G., Bosgoed Henricus Wilhelmus F. 2012. *Floor Provided With Heating Means Or Such Like*. WO2012018254A2
- Wachi T., Okubo H., Matsue T. 2000. *Heat-Storage-Type Heating Floor Material*. JP2000088263A
- Wang L. 2014. *Underground Water Heating Floor Combined With Phase-Change Materials*. CN203571838U
- Xin W., Ruolang Z., Yinping Z., Wei X., Hongfa D., Rui Y., Qunli Z. 2009. *Dry-Type Phase Change Thermal Storage Floor Heating Terminal Device*. CN201206309Y
- Xin W., Ruolang Z., Yinping Z., Wei X., Hongfa D., Rui Y., Qunli Z. 2009. *Solar Phase Change Floor Straight-Supply Heating System*. CN201209911Y
- Yao W., Zhang X., Xia Y., Liu B., Zhang R., Wang F. 2013. *Cold And Heat Integration Double-Layer Capillary Tube Phase Change Energy Storage Floor Tail End Device And Application System*. CN203323228U
- Yit Germany Gmbh [Solicitante] 2014. *A Device For Controlling The Temperature Of A Room*. DE202013100848U1
- Zhang Y., Di H., Yang R. 2002. *Electrically Heating Floor With Phase Change Heat Accumulation*. CN1369669A
- Zhang Y., Di H., Yang R. 2002. *Phase Change Heat Storage Electric Heating Floor*. CN2526708Y
- Zhang Y., Lin K., Di H. 2005. *Phase Transformation Energy Accumulation Ceiling Air-Conditioner Heating Method And Apparatus*. CN100347487C

Normas

- ANSI/ASHRAE Standard 140-2014. *Standard method of test for the evaluation of building energy analysis computer programs*.
- ASTM C1784-14 2014. *Standard test method for using a heat flow meter apparatus for measuring thermal storage properties of phase change materials and products*.
- ASTM D3806-89 2011. *Standard Test Method of Small-Scale Evaluation of Fire-Retardant Paints (2-Foot Tunnel Method)*.
- ASTM E1354-15a 2015. *Standard Test Method for Heat and Visible Smoke Release Rates for Materials and Products Using an Oxygen Consumption Calorimeter*.
- ASTM E84-15a 2015. *Standard Test Method for Surface Burning Characteristics of Building Materials*.
- CAN/ULC-S102-10 2010. *Standard Method of Test for Surface Burning Characteristics of building Materials and Assemblies*.
- CTE 2006. *Código Técnico de la Edificación*.
- NF DTU 65.14 P1 2006. *Exécution de planchers chauffants à eau chaude - Partie 1: cahier des clauses techniques - Dalles désolidarisées isolées*.
- NF P 61-203 (DTU 26.2/52.1) 2003. *Mise en oeuvre de sous-couches isolantes sous chape ou dalle flottantes et sous carrelage. Cahier des clauses techniques*.
- UNE-EN 1015-10 1999. *Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 10: Determinación de la densidad aparente en seco del mortero endurecido*.
- UNE-EN 12390-7 2001. *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7: Densidad del hormigón endurecido*.

- UNE-EN 1264-1 1998. *Calefacción por suelo radiante. Sistemas y componentes. Parte 1: Definiciones y símbolos.*
- UNE-EN 1264-2 2009. *Sistemas de calefacción y refrigeración de circulación de agua integrados en superficies. Parte 2: Suelo radiante: Métodos para la determinación de la emisión térmica de los suelos radiantes por cálculo y ensayo.*
- UNE-EN 1264-3 2010. *Sistemas de calefacción y refrigeración de circulación de agua integrados en superficies. Parte 3: Dimensionamiento.*
- UNE-EN 1264-4 2010. *Sistemas de calefacción y refrigeración de circulación de agua integrados en superficies. Parte 4: Instalación.*
- UNE-EN 13501-1 2007. *Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación. Parte 1: Clasificación a partir de datos obtenidos en ensayos de reacción al fuego.*
- UNE-EN 13790 2011. *Eficiencia energética de los edificios. Cálculo del consumo de energía para calefacción y refrigeración de espacios.*
- UNE-EN 13791 2013. *Comportamiento térmico de los edificios. Cálculo de las temperaturas interiores de un local sin refrigeración mecánica en verano. Criterios generales y procedimientos de validación.*
- UNE-EN 13813 2014. *Morteros para recrecidos y acabados de suelos. Propiedades y requisitos.*
- UNE-EN 15265 2007. *Prestaciones térmicas de los edificios. Cálculo de las necesidades energéticas para calefacción y aire acondicionado. Criterios generales y procedimientos de validación.*
- UNE-EN 15377-3 2008. *Sistemas de calefacción en los edificios. Diseño de sistemas empotrados de calefacción y refrigeración por agua. Parte 3: Optimización para la utilización de fuentes de energía renovables.*

Páginas web

- ANSYS-Fluent. <http://www.ansys.com>
- Autarkis. <http://www.autarkis.nl/nl/nieuws/archief/revolutionaire-ondervloer-in-de-telegraaf>
- Berkeley Lab Window. <https://windows.lbl.gov/software/window/window.html>
- Bronkhorst High-Tech B.V. <http://www.bronkhorst.com/>
- C-Therm Technologies. Thermal Conductivity Instruments. <http://www.ctherm.com>
- COMSOL Multiphysics Modeling Software. <https://www.comsol.com>
- Cristopia Energy Systems. <http://www.cristopia.com>
- CYPE Ingenieros. Software para Arquitectura, Ingeniería y Construcción. <http://www.cype.es/>
- DOE 2. <http://www.doe2.com/>
- DuPont Energain. http://energain.co.uk/Energain/en_GB/index.html
- Eco Building Boards. <http://ecobuildingboards.weebly.com>
- EES (Engineering Equation Solver). <http://www.fchart.com/ees/>
- Emco. <http://www.emco-klima.com/index.html>

EnergyPlus.

http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/?utm_source=EnergyPlus&utm_medium=redirect&utm_campaign=EnergyPlus%2Bredirect%2B1

EnOB Research for energy-optimised building. <http://www.enob.info>

ESP-r. <http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r.htm>

Espacenet Patent Search. <http://www.worldwide.espacenet.com>

Eurotherm Radiant Comfort Systems. <http://www.eurotherm.info>

Fraunhofer ISE. <https://www.ise.fraunhofer.de/en>

Google Patents. <https://patents.google.com>

Grupo CIAT. <http://www.grupociat.es>

IEA Annex 21. Environmental Performance. <http://www.ecbcs.org/annexes/annex21.htm>

IEA ECES Annex 23. Energy storage in buildings of the future. <http://www.iea-ec.es/annexes/completed-annexes/annex-23.html>

IEA SHC Task 12. Building energy analysis and design tools for solar applications, http://archive.iea-shc.org/tasks/task12_page.htm

IEA SHC Task 22. Building Energy Analysis Tools: Analyzing Solar And Low-Energy Buildings. <http://task22.iea-shc.org>

IEA SHC Task 34. Testing and Validation of Building Energy Simulation Tools. <http://task34.iea-shc.org/>

IEA SHC Task 42. <http://task42.iea-shc.org>

Ilkazell Isoliertechnik. <http://www.ilkazell.de/ilkazell.html>

Knauf. <http://www.knauf.es/index.php/es>

Micronal PCM Climate Control. <http://www.micronal.de>

Netzsch. <https://www.netzsch.com/us/header/company>

Phase Change Energy Solutions. <http://www.phasechange.com>

RAL Gütezeichen Phase Change Material. <http://www.pcm-ral.de/en/homepage-new.html>

Rubitherm GmbH. <http://www.rubitherm.eu>

SGL Group. The Carbon Company. http://www.sglgroup.com/cms/international/home/index.html?__locale=en

TRANSYS. <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/>

U.S. Department of Energy. Energy Efficiency & Renewable Energy. <https://www.energycodes.gov>

Unifloor Underlay Systems BV. <http://www.unifloor.nl/referentie.php?id=57&taal=nederlands>

Uponor. <https://www.uponor.es>